



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING



ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO
INŽENÝRSTVÍ
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

VÝZKUM PROGRESIVNÍCH METOD SNIŽOVÁNÍ OBSAHU ŠKODLIVÝCH LÁTEK VE VÝFUKOVÝCH PLYNECH VZNĚTOVÝCH MOTORŮ

RESEARCH PROGRESSIVE METHODS FOR REDUCTION OF EMISSIONS IN CI ENGINE EXHAUST
GASSES

DISERTAČNÍ PRÁCE
THESIS

AUTOR
AUTHOR

Ing. RUDOLF FRANZ

ŠKOLITEL
SUPERVISOR
BRNO 2019

doc. Ing. PAVEL NOVOTNÝ, Ph.D.



ABSTRAKT

Náplní této disertační práce je popis moderních metod snižování obsahu škodlivých látek u vznětových motorů. Stěžejní částí je uplatnění těchto metod pro vznětové motory pro mimosilniční použití, to znamená pro motory, které se využívají v traktorech a mimosilničních strojích. V závěru jsou zde zmíněna fakta svědčící o využitelnosti výsledků této disertační práce v praxi a jejich ověření na skutečném motoru.

KLÍČOVÁ SLOVA

Oxidy dusíku, pevné částice, recirkulace výfukových plynů, aftertreatment - dodatečná úprava výfukových plynů, spalování, oxidační katalyzátor, filtr pevných částic, selektivní katalytická redukce.

ABSTRACT

The scope of this dissertation work is a description of modern methods of reducing exhaust emission in diesel engines. The fundamental part is the application of these methods for diesel engines for off-road use that means for engines that are used in tractors and road machines. The mentioned evidence for the practical utility of the results of this dissertation thesis in practice and their verification on the actual engine are given in the conclusion.

KEYWORDS

Nitrogen oxides, Particulate matter, Exhaust Gas Recirculation , Combustion process, Diesel Oxidation catalyst, Diesel Particulate Filter, Selective Catalytic Reduction

.



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

FRANZ, Rudolf. *Výzkum progresivních metod snižování obsahu škodlivých látek ve výfukových plynech*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2019. 95 s. Vedoucí disertační práce doc. Ing. Pavel Novotný, Ph.D.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Pavla Novotného, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 16. prosince 2019

.....

Rudolf Franz



PODĚKOVÁNÍ

Za umožnění tvorby této práce a konstruktivní kritiku během tvorby této disertační práce děkuji svému školiteli doc. Ing. Pavlovi Novotnému, Ph.D. Dále bych rád poděkoval kolektivu vývojových pracovníků motorů firmy Zetor jmenovitě Ing. Radimovi Dundálkovi, Ing. Zdeňku Hrdličkovi, Ing. Karlu Šidlovi a Ing. Pavlovi Procházkovi, bez kterých by tato práce nemohla vzniknout. Velké poděkování za pochopení, toleranci a podporu patří rovněž mé přítelkyni Haně.



OBSAH

ÚVOD.....	8
1 VYMEZENÍ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	9
2 SHRUTÍ SOUČASNÉHO STAVU EMISNÍCH LIMITŮ PRO MIMOSILNIČNÍ VZNĚTOVÉ MOTORY	10
2.1 ZKUŠEBNÍ CYKLY PRO MIMOSILNIČNÍ MOTORY	11
2.1.1 ZKUŠEBNÍ CYKLUS STACIONÁRNÍ (NRSC) DLE 97/68/ES	11
2.1.2 ZKUŠEBNÍ CYKLUS NESTACIONÁRNÍ (NRTC) DLE 97/68/ES	11
2.1.3 SPECIFIKACE STACIONÁRNÍHO MĚŘICÍHO CYKLU (NRSC) DLE 97/68/ES	12
2.1.4 SPECIFIKACE NESTACIONÁRNÍHO MĚŘICÍHO CYKLU (NRTC) DLE 97/68/ES	12
2.2 METODY SNÍŽENÍ PEVNÝCH ČÁSTIC	14
2.2.1 POPIS METODIKY SNÍŽENÍ PEVNÝCH ČÁSTIC	14
2.2.2 OXIDAČNÍ KATALYZÁTOR.....	15
2.3 METODY SNÍŽENÍ OXIDŮ DUSÍKU	16
2.3.1 RECIRKULACE VÝFUKOVÝCH PLYNŮ - EGR	16
2.3.2 SELEKTIVNÍ KATALYTICKÁ REDUKCE	16
3 DEFINOVÁNÍ KONCEPCÍ ŘEŠENÍ EMISÍ.....	17
3.1 ZÁKLADNÍ PARAMETRY VÝCHOZÍHO MOTORU A STAV EMISÍ	17
3.2 EMISNÍ PŘEDPIS A JEHO VLIV NA KONSTRUKČNÍ ÚPRAVY MOTORU ..	18
3.3 SYSTÉMY DODATEČNÉ ÚPRAVY VÝFUKOVÝCH PLYNŮ	21
3.3.1 VARIANTA 1	21
3.3.2 VARIANTA 2	22
4 VYMEZENÍ CÍLŮ DISERTAČNÍ PRÁCE	23
5 ASISTOVANÁ REGENERACE DPF FILTRU	24
5.1 NÁVRH SYSTÉMU SLEDOVÁNÍ STAVU ZANESENÍ DPF FILTRU	24
5.2 REGENERACE DPF FILTRU	28
5.3 VÝPARNÍK NAFTY PRO ASISTOVANOU REGENERACI - VAPORIZÉR.....	31
5.4 VÝPOČET MNOŽSTVÍ VSTŘIKOVANÉ NAFTY POTŘEBNÉ PRO REGENERACE DPF FILTRU	33
5.5 OVĚŘENÍ REGENERACÍ NA MOTOROVÉ BRZDĚ.....	35
6 SCR KATALYZÁTOR.....	38
6.1 NÁVRH SYSTÉMU SCR.....	38
6.2 DÁVKOVACÍ SYSTÉM MOČOVINY	41
6.3 NÁDRŽ MOČOVINY A PODÁVACÍ SYSTÉM	42
6.4 STRATEGIE VSTŘIKOVÁNÍ MOČOVINY	43



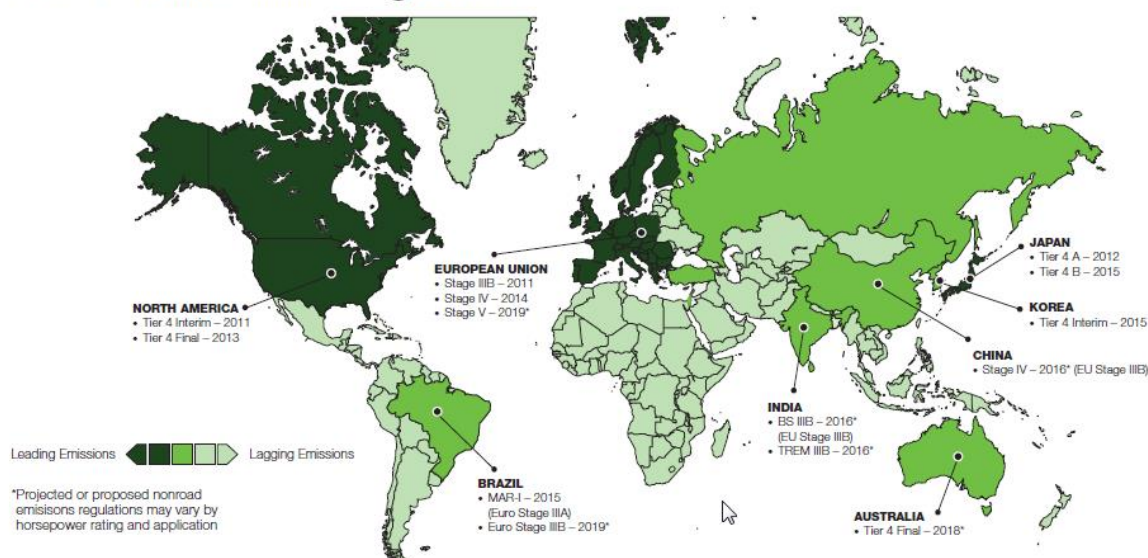
6.4.1	VÝPOČET MNOŽSTVÍ VSTŘIKOVANÉ MOČOVINY.....	44
6.4.2	OMEZUJÍCÍ PARAMETRY VSTŘIKOVANÉHO MNOŽSTVÍ MOČOVINY	45
7	ZÁKLADNÍ MAPOVÁNÍ SUROVÝCH EMISÍ MOTORU.....	51
7.1	HODNOTY PLYNNÝCH EMISÍ MOTORU	51
7.2	STRATEGIE EGR NA MĚŘENÉM MOTORU	51
7.3	PLYNNÉ EMISE V ZATĚŽOVACÍ CHARAKTERISTICE PŘI 2300 [1/MIN] ..	52
7.4	PLYNNÉ EMISE V ZATĚŽOVACÍ CHARAKTERISTICE PŘI 2200 [1/MIN] (MAXIMÁLNÍ VÝKON MOTORU).....	55
7.5	PLYNNÉ EMISE V ZATĚŽOVACÍ CHARAKTERISTICE PŘI 1800 [1/MIN] ..	57
7.6	PLYNNÉ EMISE V ZATĚŽOVACÍ CHARAKTERISTICE PŘI 1480 [1/MIN] (MAXIMÁLNÍ TOČIVÝ MOMENT).....	60
7.7	PLYNNÉ EMISE V ZATĚŽOVACÍ CHARAKTERISTICE PŘI 1240 [1/MIN] ..	63
7.8	PLYNNÉ EMISE V ZATĚŽOVACÍ CHARAKTERISTICE PŘI 1000 [1/MIN] ..	65
8	MĚŘENÍ EMISÍ MOTORU S AFTERTREATMENTEM.....	68
8.1	MĚŘENÍ V STATICKÉM 8-BODOVÉM EMISNÍM TESTU (NRSC).....	68
8.2	MĚŘENÍ V TRANZIENTNÍM TESTU (NRTC)	75
8.3	PŘEHLED VŠECH TESTŮ PROVÁDĚNÝCH V RÁMCI OPTIMALIZACE EMISNÍHO SYSTÉMU	79
9	ZÁVĚR.....	85
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	88
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	91
	SEZNAM PŘÍLOH	95



ÚVOD

Problematika snižování škodlivých emisí ve výfukových plynech je v současné době vývoje spalovacích motorů jedna z nejvíce diskutovaných otázek. Na snižování emisí spalovacích motorů jsou kladeny čím dál vyšší požadavky. Nejvíce rozvinuté země se snaží snižování emisí řídit pomocí emisních limitů, které musí nově vyráběné motory plnit, jinak jim nebude poskytnuta homologace, tudíž nemohou být sériově vyráběny. Po počátečních emisních limitech, které zvláště u vznětových motorů bylo možno splnit pomocí optimalizace spalování, se nyní přechází k velmi přísným emisním limitům, jejichž splnění již vyžaduje dodatečnou úpravu výfukových plynů. Právě těmito novými progresivními metodami se zabývá tato práce. Obecně lze konstatovat, že tyto nové systémy lze aplikovat na všechny vznětové motory, ale je nutné si uvědomit, že použití motoru v dané aplikaci má již značný vliv na množství a spektrum výfukových plynů. To se projevuje jak ve vlastních limitech, tak v předepsaných zkušebních cyklech pro schválení daného motoru. Tato práce se soustřeďuje na motory, které se využívají v mimosilničním provozu, speciálně v traktorech.

Global Emissions Regulations.



Obr. 1 Emisní limity pro mimosilniční aplikace z celosvětového pohledu [1]



1 VYMEZENÍ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Vznětové spalovací motory soudobých stavebních strojů a traktorů jsou z hlediska propracovanosti a vývoje na velmi vysoké úrovni, přesto emisní limity předepsané legislativou je pro mnohé výrobce velmi náročné splnit.

Z hlediska škodlivosti na zdraví se jako nejvíce škodlivé ukazují u vznětových motorů emise oxidů dusíků, pevných částic, emise oxidu uhelnatého a uhlovodíky [2].

Vliv na zdraví jednotlivých emisí:

- **oxid uhelnatý (CO)** – blokuje přenos kyslíku pomocí krve
- **oxidy dusíku (NO_x)** – některé z nich způsobují již při malých koncentracích pocit dušení a nucení ke kašli, zvyšují pravděpodobnost onemocnění dýchacích cest
- **uhlovodíky (HC)** – některé skupiny uhlovodíků dráždí sliznici a oči, některé skupiny uhlovodíků mohou být karcinogenní
- **prachové částice (PM)** - inhalace pevných prachových částic poškozuje především kardiovaskulární a plicní systém

Z hlediska problematiky snižování emisí u vznětového motoru se jako nejhorší ukazuje snížení emisí NO_x a PM. Tyto emise jsou komplementárně spojeny a na základě provedených experimentů [1] jdou vždy proti sobě. Úpravou spalování lze snížit celkové emise těchto dvou složek na určitou hodnotu, ale většinou dojde k tomu, že pokud se nám povede snížit jednu z těchto složek, dojde k nárůstu té druhé. Je to dáno termomechanikou spalovacího procesu. Pro snížení NO_x je důležité snížit teploty vlastního hoření. To má za následek zvýšení pevných částic. Platí to i naopak. Zvýšení teplot hoření má příznivý vliv na pevné částice, přičemž NO_x nám rostou [1]. Vlastní optimalizace spalovacího procesu již nyní dosáhla při současném stavu vědění a technologických možností svého vrcholu. Pro splnění nynějších nejpřísnějších emisních předpisů je nutné přistoupit k dodatečné úpravě výfukových plynů. Z hlediska možné implementace do vozidla se za progresivní jeví metoda selektivní katalytické redukce pro snížení oxidů dusíku a použití částicového filtru pro snížení pevných částic [3].



2 SHRnutí SOUČASNÉHO STAVU EMISNÍCH LIMITŮ PRO MIMOSILNIČNÍ VZNĚTOVÉ MOTORY

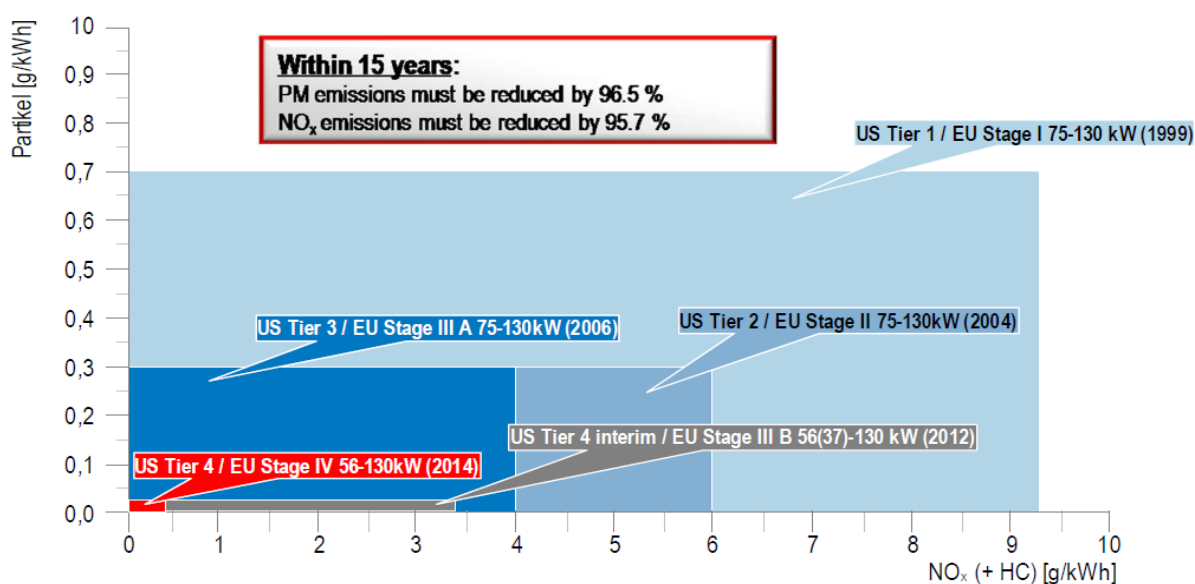
Vývoj emisních limitů pro mimosilniční aplikace dle evropských, amerických a japonských standardů znázorňuje následující Obr. 2. Je zde názorně vidět snížení emisí NO_x a PM od roku 1996, kdy náběhem emisního stupně STAGE IV došlo k 90% snížení [1].

		U.S. EPA Emissions								
		Tier 2		Tier 3		Tier 4i		Tier 4		
Power		Year								
[kW]	[HP]	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
0-18	0-24	(7,5)/6,6/0,40								
19-37	25-48	(7,5)/5,5/0,30			(4,7)/5,0/0,03					
37-55	49-74	(7,5)/5,5/0,30			(4,7)/5,0/0,03					
56-129	75-173	(4,0)/5,0/0,30			3,4/0,19/5,0/0,02			0,4/0,19/5,0/0,02		
130-560	174-751	(4,0)/5,0/0,20		2,0/0,19/3,5/0,10			0,4/0,19/3,5/0,02			
>560	>751	(6,4)/3,5/0,20		3,5/0,40/3,5/0,10			3,5/0,19/3,5/0,04			

NO_x/HC/CO/PM
(NO_x+HC)/CO/PM

		Europe Emissions								
		Stage IIIA			Stage IIIB			Stage IV		
Power		Year								
[kW]	[HP]	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
19-36	24-48	(7,5)/5,5/0,60								
37-55	49-74	(4,7)/5,0/0,40			(4,7)/5,0/0,025					
56-129	75-173	(4,0)/5,0/0,30		3,3/0,19/5,0/0,025				0,4/0,19/5,0/0,025		
130-560	174-751	(4,0)/3,5/0,20	2,0/0,19/3,4/0,025			0,4/0,19/3,5/0,025				
>560	>751							3,5/0,19/3,5/0,045		

NO_x/HC/CO/PM
(NO_x+HC)/CO/PM



Obr. 2 Vývoj emisních limitů [1]



2.1 ZKUŠEBNÍ CYKLY PRO MIMOSILNIČNÍ MOTORY

Dle směrnice 97/68/ES pro mimosilniční motory jsou stanoveny dva měřicí cykly:

- a. cyklus NRSC (stacionární zkouška nesilničních pojízdných strojů) se použije pro etapy I, II a III A a u motorů s konstantními otáčkami též pro etapy III B a IV v případě plyných znečišťujících látek
- b. cyklus NRTC (dynamická zkouška nesilničních pojízdných strojů) se použije k měření emise částic pro etapy III B a IV u všech motorů s výjimkou motorů s konstantními otáčkami. Podle volby výrobce může být tato zkouška použita též pro etapu III A a pro plyné znečišťující látky v etapách III B a IV.

2.1.1 ZKUŠEBNÍ CYKLUS STACIONÁRNÍ (NRSC) DLE 97/68/ES

V průběhu předepsaného sledu provozních podmínek při zahřátém motoru se kontinuálně zjišťuje množství emisí odebráním vzorků ze surového výfukového plynu. Zkušební cyklus se skládá z řady režimů otáček a točivého momentu (zatížení), které zahrnují typický rozsah provozu vznětového motoru. V průběhu každého režimu se stanoví koncentrace každé plyné znečišťující látky, průtok výfukového plynu a výkon a z výsledků měření se stanoví vážené hodnoty. Vzorek částic se ředí stabilizovaným vzduchem z okolí. Jeden vzorek se odebere v průběhu celého zkušební cyklu a zachytí se na vhodných filtrech. Alternativně se odebírají vzorky na oddělených filtrech, po jednom vzorku pro každý režim, a vypočítávají se vážené hodnoty pro zkušební cyklus.

2.1.2 ZKUŠEBNÍ CYKLUS NESTACIONÁRNÍ (NRTC) DLE 97/68/ES

Předepsaný nestacionární zkušební cyklus, který věrně odráží provozní podmínky vznětových motorů instalovaných v nesilničních strojích, se uskutečňuje dvakrát:

— poprvé (při startu za studena), když je motor ochlazen na pokojovou teplotu a teplota chladiva a oleje motoru, systémů následného zpracování a všech pomocných zařízení pro regulaci emisí se stabilizovala v rozmezí od 20 °C do 30 °C

— podruhé (při startu za tepla) po 20 minutách chodu za tepla, následujícím bezprostředně po cyklu se startem za studena

V průběhu této zkušební posloupnosti se zjišťují výše uvedené znečišťující látky. S použitím signálů naměřených hodnot točivého momentu a otáček motoru vysílaných dynamometrem se integrací výkonu přes celou dobu cyklu stanoví práce, kterou motor během cyklu vykonal. Určí se koncentrace plyných složek za celý cyklus buď v surovém výfukovém plynu integrací signálu analyzátoru, nebo ve zředěném výfukovém plynu ze systému CVS s ředěním plného toku integrací nebo odběrem vzorků do vaků. V případě částic se na stanoveném filtru zachycuje proporcionální vzorek zředěného výfukového plynu při ředění buď části toku, nebo plného toku. V závislosti na použité metodě se pro výpočet hmotnostních hodnot emisí znečišťujících látek určí průtok zředěného nebo nezředěného výfukového plynu v průběhu celého cyklu. Vztažením hmotnostních hodnot emisí k práci motoru se určí množství každé znečišťující látky v g/kWh na kilowatthodinu. Emise (v g/kWh) se měří v průběhu obou cyklů se startem jak za studena, tak za tepla.



Vážená kombinovaná hodnota emisí se vypočítá vážením výsledků získaných při startu zastudena faktorem 0,10 a výsledků získaných při startu za tepla faktorem 0,90. Vážení kombinované hodnoty musí být v souladu s normou.

2.1.3 SPECIFIKACE STACIONÁRNÍHO MĚŘICÍHO CYKLU (NRSC) DLE 97/68/ES

U motorů pro traktory se zkoušený motor podrobí tomuto osmirežimovému cyklu na dynamometru:

Tab. 1 Režimy NRSC cyklu

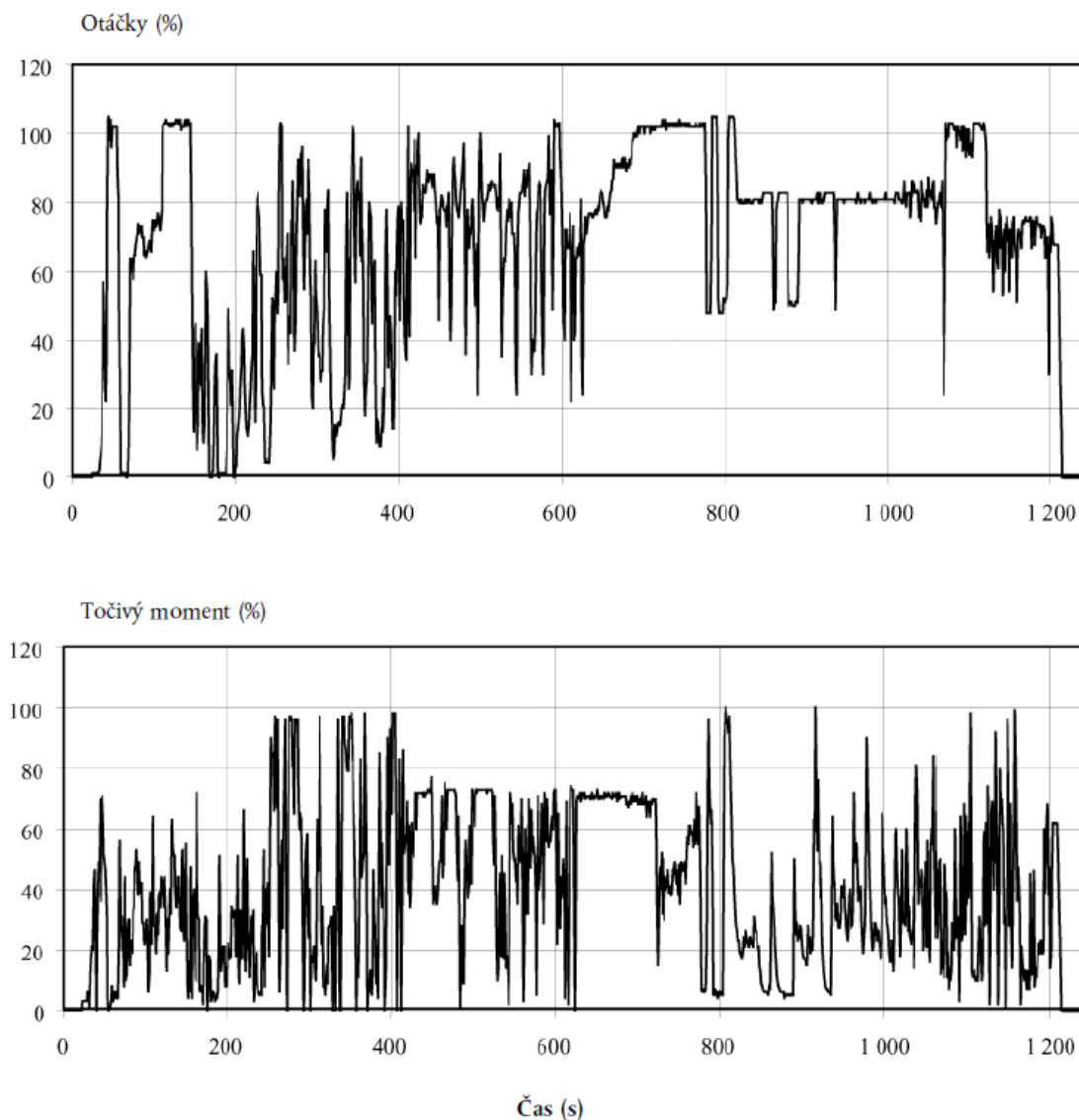
Číslo režimu	Otáčky motoru	Zatížení (%)	Váhový faktor
1	jmenovité	100	0,15
2	jmenovité	75	0,15
3	jmenovité	50	0,15
4	jmenovité	10	0,10
5	mezilehlé	100	0,10
6	mezilehlé	75	0,10
7	mezilehlé	50	0,10
8	volnoběžné	-	0,15

2.1.4 SPECIFIKACE NESTACIONÁRNÍHO MĚŘICÍHO CYKLU (NRTC) DLE 97/68/ES

Cyklus přechodné zkoušky nesilničních pojízdných strojů (NRTC) je uveden jako po sekundách se měnící sled normalizovaných hodnot otáček a točivého momentu, použitelný pro všechny vznětové motory, na které se vztahuje směrnice 97/68/ES. Aby bylo možné zkoušku ve zkušební komoře motorů provést, převedou se normalizované hodnoty pro jednotlivé zkoušené motory na skutečné hodnoty na základě mapovací křivky motoru. Tento převod se označuje jako denormalizace a příslušný zkušební cyklus jako referenční cyklus motoru určeného ke zkoušce. S použitím takto získaných referenčních hodnot otáček a točivého momentu se uskuteční zkušební cyklus ve zkušební komoře, přičemž se zaznamenají naměřené hodnoty otáček a točivého momentu. K ověření zkoušky se po jejím skončení provede regresní analýza vztahu mezi referenčními a naměřenými hodnotami otáček a točivého momentu.



Grafické znázornění průběhu zkoušky NRTC na dynamometru



Obr. 3 Režimy NRTC cyklu

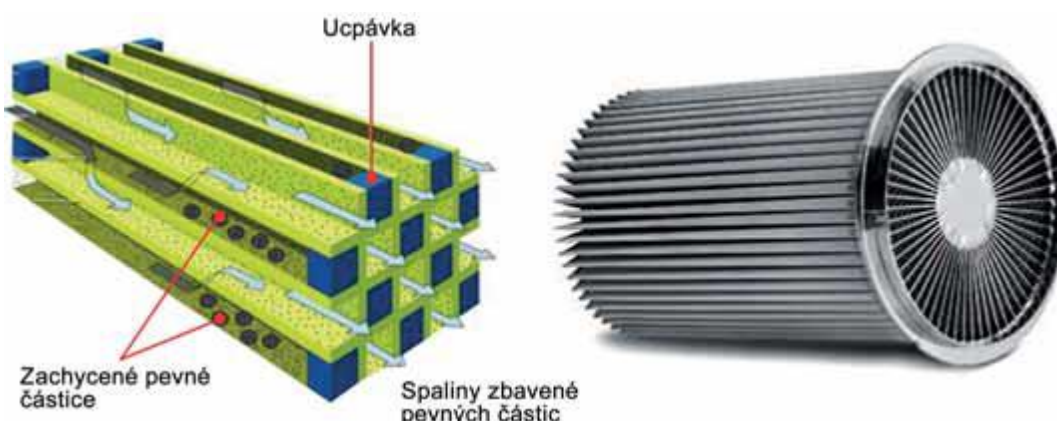
Celé znění směrnice 97/68/ES je součástí příloh této disertační práce. V kapitolách 2.1.1 až 2.1.4 je stručný výtah z této směrnice.



2.2 METODY SNÍŽENÍ PEVNÝCH ČÁSTIC

2.2.1 POPIS METODIKY SNÍŽENÍ PEVNÝCH ČÁSTIC

Snížování limitů pevných částic vede k použití systému dodatečné úpravy výfukových plynů za použití DPF filtrů [4].



Obr. 4 Princip funkce filtru na pevné částice v provedení SMT – sintrovaný kovový filtr [5]

DPF filtr má za úkol s vysokou účinností pevné částice zachytit. Umísťuje se do výfukového potrubí, často ve společném tělese s oxidačním katalyzátorem. Filtr má voštinovou nebo vláknovou strukturu a tvoří ho například [6]:

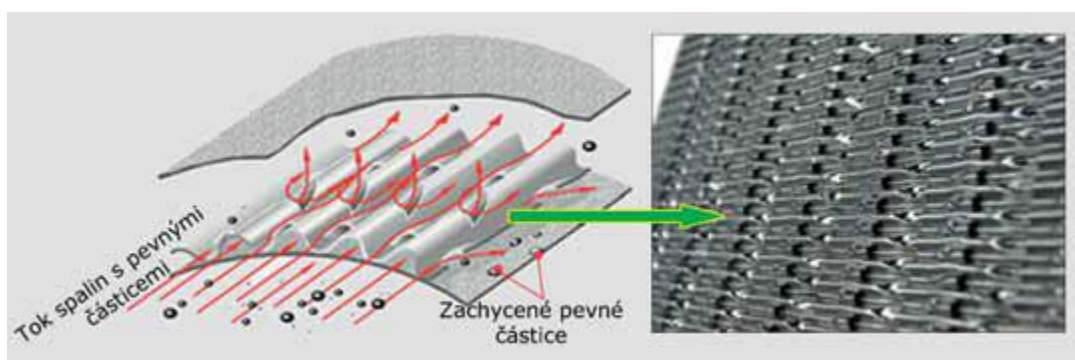
- sycené silikáty hliníkem (Cordeirit)
- karbid křemíku (Silicium karbid)
- spékané kovy

Výfukové plyny se na vstupu filtru rozdělují do mnoha komor, které jsou mezi sebou odděleny porézními stěnami o tloušťce 300 – 400 μm [7]. Těmito stěnami musí plyn procházet dál, aby se dostal z filtru ven. Dochází přitom k zachytávání pevných částic uvnitř těchto stěn. Schematicky je zobrazen na Obr. 3. Uvedené řešení se označuje jako uzavřený systém, protože částice nemají volný průchod přes filtr. Druhé řešení se označuje jako otevřený systém např. TwinTec [5], u kterého nemusí proudící plyn překonávat žádnou překážku, čímž se snižuje odpor proudění. Příklad tohoto řešení je uveden na Obr. 4. Proud plynu se rozděluje pomocí tvarovaných výstupků, které ho usměřují na povrch ze spékaných materiálů, na kterém se pevné částice zachycují. Zachytáváním částic dochází u obou systémů k postupnému zaplňování filtru, což vyžaduje buď jeho výměnu, nebo použití regenerativního systému. Ten umožňuje kontinuální nebo periodické automatické čištění, při kterém dochází ke spalování zachycených částic na CO_2 s malým podílem sazí. Pevné částice, jak již bylo výše zmíněno, tvoří z větší části saze, zbytky paliva a oleje. Aby docházelo ke spalování (vypalování) sazí, musí se teplota výfukových plynů zvýšit nad hodnotu meze zápalnosti sazí, tzn. 600 $^{\circ}\text{C}$ [8]. Protože tak vysoká teplota je v praxi obtížně dosažitelná během provozu, musí se její velikost „uměle“ navýšit nebo snížit teplotu vznícení sazí.



Systémy regenerace lze rozdělit na:

- Aktivní - jsou charakteristické přiváděním dodatečné energie pro zvýšení teploty spalin např. pomocí topné spirály, hořením paliva v komoře filtru (hořák), opožděným vstřikem paliva se spálením ve spalovacím prostoru, opožděným vstřikem paliva se zapálením v katalyzátoru
- Pasivní - používají opatření s předřazeným oxidačním katalyzátorem, nebo filtry s aktivní vrstvou (platina) CDPF (Catalyzed Diesel Particulate Filter), popřípadě přidáváním aditiv do paliv, která snižují teplotu vznícení sazí na 250°C – 300 °C, čímž dochází ke kontinuální regeneraci



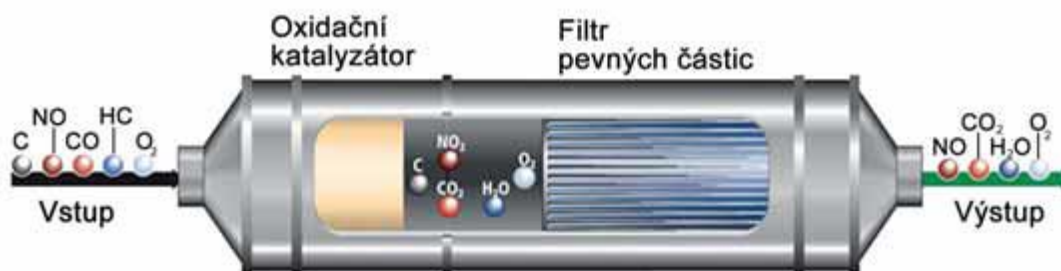
Obr. 5 Otevřený systém filtrace pevných částic [5]

2.2.2 OXIDAČNÍ KATALYZÁTOR

Oxidační katalyzátor (DOC) předřazený DPF filtru umožňuje kontinuální regeneraci filtru při nižších teplotách než je teplota vznícení sazí. Chemickou reakci probíhající v oxidačním katalyzátoru lze popsat následujícími rovnicemi [5]:



Oxid uhelnatý (CO) se přeměňuje na oxid uhličitý (CO₂) a nespálené uhlovodíky (HC) z 90% na oxid uhličitý (CO₂) a vodu (H₂O). Redukce oxidů dusíku (NO_x) je kvůli přebytku vzduchu u vznětových motorů možná jen ve velmi omezené míře. Kvůli vysokému obsahu kyslíku ve výfukových plynech začíná oxidační katalyzátor účinkovat již při 170°C. Optimální provozní teplota je mezi 250 až 350°C. Důležitým faktorem je ale přeměna NO_x na NO₂. Pomocí vyššího obsahu NO₂ (působí jako oxidační činitel) ve výfukových plynech lze spalovat saze při nižších teplotách 300°C – 450°C. Při teplotách pod 300°C probíhá oxidace sazí velmi pomalu a naopak nad teplotou 450°C dochází k rozpadu NO₂. Proces regenerace probíhá účinně tehdy, jestliže je poměr NO₂ / sazí větší než 8:1 [9].



Obr. 6 Kombinace oxidačního katalyzátoru a DPF filtru [5]

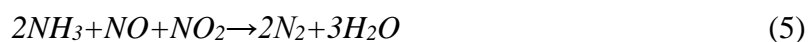
2.3 METODY SNÍŽENÍ OXIDŮ DUSÍKU

2.3.1 RECIRKULACE VÝFUKOVÝCH PLYNŮ - EGR

Zpětné vedení výfukových plynů slouží ke snížení emisí NO_x . Příměsí výfukových plynů do nasávaného vzduchu se sníží přiváděný podíl kyslíku. Součástí výfukových plynů se již neúčastní spalování a navíc pohlcují teplo. Tím klesá maximální teplota spalování a snižují se emise oxidu dusíku. Podíl recirkulace výfukových plynů může činit až 40% [10]. Pokud roste podíl recirkulace výfukových plynů nad tuto hodnotu, snižují se na jedné straně emise NO_x , na druhé straně se však nafta již nespáluje dokonale. Kvůli nedostatku kyslíku opět silně roste podíl nespálených uhlovodíků (HC) a pevných částic (PM) [10]. V praxi se ukazuje, že vysoká míra recirkulace může vést ke smyčce, která zapříčiní úplné zacpání DPF filtru. Tento proces lze popsat následujícím způsobem. Při vyšších mírách recirkulace dochází k zvyšování pevných částic, ty zapříčiňují zvýšený protitlak od DPF filtru. Pokud dojde ke zvýšení protitlaku nad 20 kPa u DPF filtru, zvyšuje se tím i míra recirkulace, což vede k uzavření smyčky (killing loop). Většinou již regenerační schopnost DPF filtru nestačí tento filtr regenerovat a dojde k úplnému ucpání filtru a tím ke kolapsu vlastního motoru. Většinou protitlak stoupne nad 50 kPa, což motor již nezvládne.

2.3.2 SELEKTIVNÍ KATALYTICKÁ REDUKCE

Toto řešení snížení oxidů dusíku je založeno na SCR katalyzátoru, ve kterém s pomocí amoniaku NH_3 dochází k reakci s oxidy dusíku a jejich přeměně na dusík N_2 a vodní páru H_2O [9].



Amoniak je toxická látka a z toho důvodu se získává až chemickou cestou po vstříknutí kapaliny s obchodním názvem „AdBlue“ do přívodního potrubí před katalyzátorem. Kapalina AdBlue je složena z 32,5 % z močoviny ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) a zbylou částí je demineralizovaná voda, která se po vstříknutí odpaří a využije se dále při chemických reakcích. Amoniak se získá ve výfukovém traktu během termolýzy a hydrolýzy [9].



3 DEFINOVÁNÍ KONCEPCÍ ŘEŠENÍ EMISÍ

3.1 ZÁKLADNÍ PARAMETRY VÝCHOZÍHO MOTORU A STAV EMISÍ

Na základě předešlých zkušeností při řešení emisního motoru v emisním stupni STAGE 3B byl pro základní výzkum použit 16-ventilový čtyřválcový motor Zetor Z1606. Tento motor vykazuje následující parametry:

Počet válců:	4
Zdvihový objem:	4 156 cm ³
Maximální výkon:	95 kW při otáčkách 2200 min ⁻¹
Maximální točivý moment:	580 Nm při otáčkách 1480 min ⁻¹
Emisní úroveň:	STAGE 3B
Palivový systém:	řadové mechanické vstřikovací čerpadlo s mechanickým regulátorem
Plnicí systém:	přeplňování turbodmychadlem s mezichlazením stlačeného vzduchu typu vzduch - vzduch
Emisní systém motoru:	vnější chlazená recirkulace výfukových plynů (EGR), dodatečná úprava výfukových plynů (aftertreatment): DOC+DPF s pasivní regenerací

Emisní parametry motoru bez dodatečné úpravy výfukových plynů tzv. surové emise byly podrobně zmapovány na zkušebně TÜV SÜD Czech. Zde byly získány tyto vstupní výsledky z testu NRSC Tab.2 :



Tab. 2 Surové emise motoru Z1606

Varianta motoru	Emise NOx surové [g/kWh]	Emise částic surové PM [g/kWh]
Z1606 s EGR, 12° předvstřík	3,83	0,23
Z1606 bez EGR, 12° předvstřík	5,92	0,11
Z1606 s EGR, 14° předvstřík	3,70	0,16
Z1606 bez EGR, 14° předvstřík	5,85	0,07
Z1606 s EGR, 14° předvstřík, vstřík. čerpadlo s vyšším tlakem	4,19	0,16
Z1606 bez EGR, 14° předvstřík, vstřík. čerpadlo s vyšším tlakem	7,41	0,09
POŽADOVANÝ LIMIT EMISÍ	0,4	0,025

Provedené laboratorní testy dokladují, že splnění emisních limitů Stage IV nelze realizovat bez použití SCR technologie, tedy uplatnění principů selektivní katalytické redukce. Pro tak významné snížení množství oxidů dusíku, které je dáno normou Stage IV, již nelze použít systém recirkulace výfukových plynů. Do výfukové soustavy je nutné zařadit SCR katalyzátor spolu se vstřikováním syntetické močoviny (AdBlue).

Vzhledem k faktu, že limity emisí pevných částic jsou pro Stage IV stejně přísné jako u Stage 3B, je jejich množství ve výfukových plynech také nutné omezit. Nejjednodušší cestou je filtr pevných částic tak jak bylo použito při řešení emisního stupně Stage 3B.

3.2 EMISNÍ PŘEDPIS A JEHO VLIV NA KONSTRUKČNÍ ÚPRAVY MOTORU

Na základě naměřených emisí a emisního předpisu 97/68/EC jsou navrženy konstrukční úpravy motoru. Z hlediska zlepšení emisí je nutné zlepšit spalování úpravou spalovacího prostoru a co nejvíce omezit vliv zahloubení ventilů na tvorbu pevných částic.

Pro splnění inovované směrnice 97/68/EC, zejména části týkající se OBD (on board diagnostic), bude nutno použít nově vyvinuté elektronicky řízené vstřikovací soupravy stejně jako sofistikovanější odvětrání klikové skříně.

Hlavní nové požadavky inovované směrnice 97/68/EC jsou uvedeny v Tab. 3



Tab. 3 Výběr z nejdůležitějších požadavků směrnice 97/68/EC

Požadavek číslo	Popis požadavku
1	Stanovené obecné podmínky funkčnosti (teplota, tlak, nadmořská výška, teplota chladicí kapaliny) pro motory Stage 3B a Stage 4
2	Používá-li se čínidlo, výrobce prokáže, že emise amoniaku během zkoušky NRTC za tepla nebo NRSC při schvalování typu nepřesáhnou střední hodnotu 10 ppm
3	Zákaz přímého odvětrání klikové skříně do atmosféry
4	Odvětrání klikové skříně musí být zahrnuto fyzicky nebo matematicky do celkových emisí motoru
5	Odběr vzorků AdBlue z nádrže musí být umožněn jednoduše bez speciálních přípravků
6	Detailní servisní a uživatelské instrukce (včetně nutnosti AdBlue doplňování a indikace AdBlue kvality jakož i popis požadavků systému a upozornění na provozní nároky systému kvalitu AdBlue a systém diagnostiky a varování) musí být dodány všem uživatelům
7	Stanovení a definování institutu „kontrolní rozsah“
8	Během homologace se nově kontrolují emise ve třech náhodně vybraných bodech
9	Výběr kategorie motoru dle max. výkonu (doposud nominál)
10	Nesprávná funkce nebo zásah do systému musí být indikován
11	Stanovení a definování „institutu počítadla“
12	V případě nesprávné funkce systému musí být primárně zobrazeno varování, např.: pokud nepracuje dávkování AdBlue, je zobrazeno varování a chyba zapsána do chybové paměti (do 60 min opatření)
13	Nesprávná funkce musí být korigována aktivováním pomocné strategie pro regulaci emisí (3 stupně) a podmínky, za nichž může být omezení činnosti stroje zrušeno
14	Požadavky na životnost – pro mimosilniční aplikace 8000 hod
15	Je vyžadována stabilní citlivost emisního systému po dobu životnosti motoru
16	AdBlue úroveň musí být kontrolována průběžně (palubní deska) stejně tak indikace 10% a upozornění na rezervu po zapnutí zapalování. Je-li hladina pod 2,5%, pak se aktivuje systém mírného upozornění
17	AdBlue úroveň musí být kontrolována průběžně (palubní deska) stejně tak indikace 10% a upozornění na rezervu po zapnutí zapalování. Je-li hladina pod 2,5%, pak se aktivuje systém mírného upozornění
18	Musí být zajištěna opětovná funkčnost systému (70 min, -7°C) dávkování NOx (zkouška v mrazicí komoře)
19	Lze homologovat rodinu NDC (ATS) pro různé motory
20	Kvalita AdBlue musí být kontrolována průběžně
21	Systém mírného upozornění se musí aktivovat, jestliže nedojde k nápravě jakosti čínidla nejpozději do 10 hodin provozu motoru od okamžiku aktivace systému varování provozovatele
22	Systém důrazného upozornění se musí aktivovat, jestliže nedojde k nápravě jakosti čínidla, nejpozději do 20 hodin provozu motoru
23	Úroveň NOx nesmí překročit 0,9 g/kWh

Systémy omezení točivého momentu při mírném a důrazném upozornění je zobrazen v Obr. 7.

Schéma snížení točivého momentu při mírném upozornění

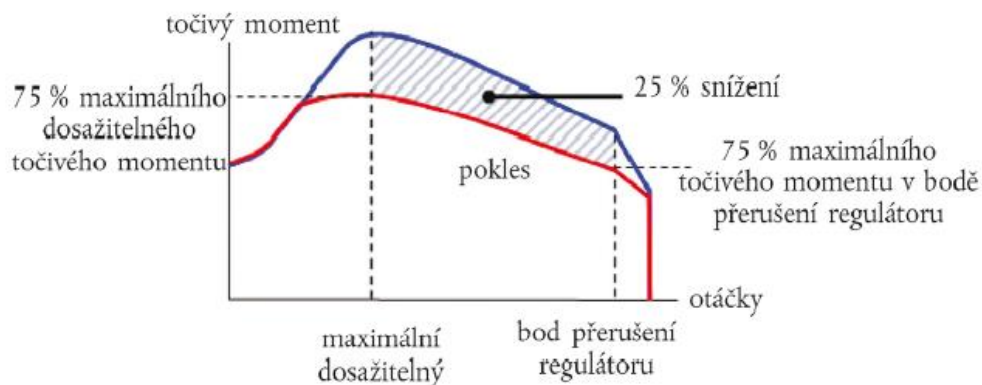
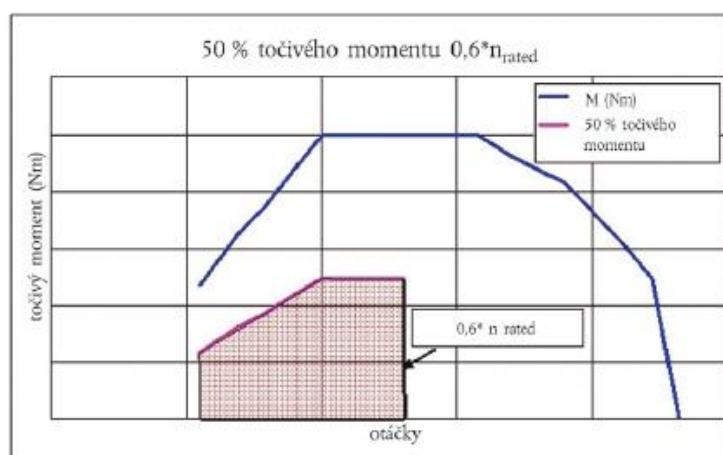


Schéma snížení točivého momentu při důrazném upozornění



Obr. 7 Systémy omezení dle legislativy 97/68/ES



3.3 SYSTÉMY DODATEČNÉ ÚPRAVY VÝFUKOVÝCH PLYNŮ

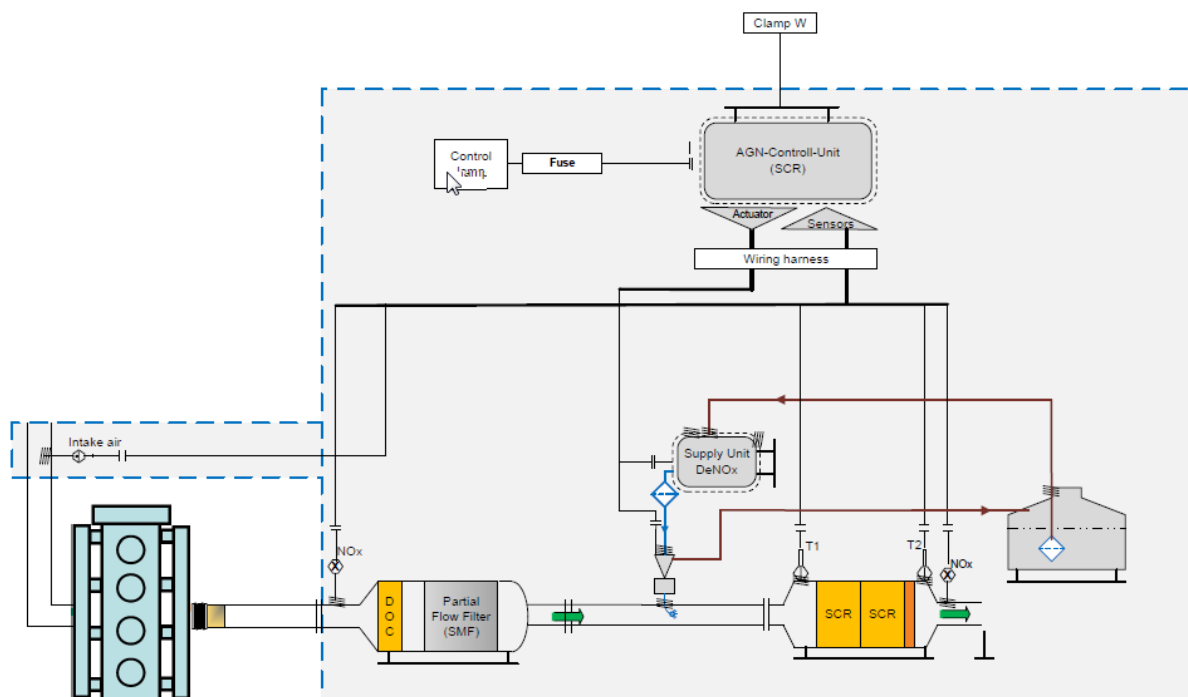
Pro řešení základní koncepce jsou navrženy dvě varianty systémů dodatečné úpravy výfukových plynů.

3.3.1 VARIANTA 1

Varianta číslo 1 je složena z:

- Oxidačního katalyzátoru DOC.
- Filtru pevných částic CRT typu „through-flow“ (průchozí filtr pevných částic).
- SCR katalyzátoru.

Filtr pevných částic je v tomto případě založen na metalické bázi. Dodavatelem je německá firma HJS, schéma systému je patrné z Obr. 8.



Obr. 8 Návrh schématu rozmístění a zapojení komponentů od firmy HJS pro výfukový systém motoru Z1606

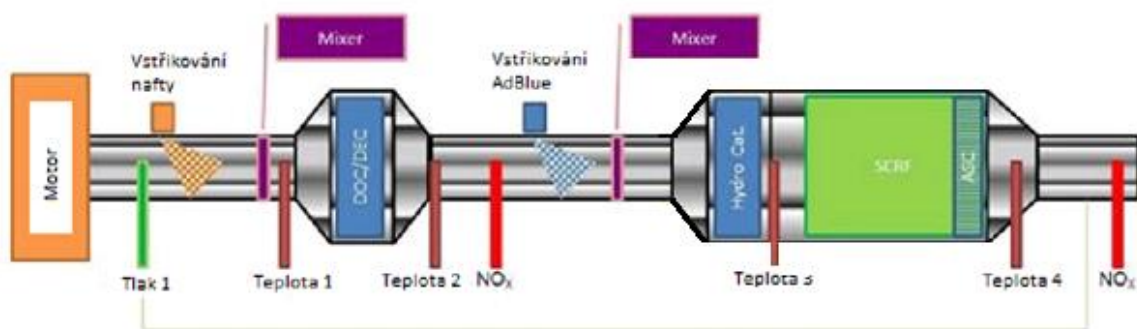


3.3.2 VARIANTA 2

Varianta číslo 2 je složena z:

- Oxidačního katalyzátoru DOC a
- SCRF katalyzátoru.

Základ SCRf katalyzátoru je tvořen keramickým filtrem pevných částic typu „wall-flow“, ovšem s povrchovou úpravou kanálků vhodnou pro selektivní katalytickou redukci. Toto velmi kompaktní řešení spojuje filtr částic a katalyzátor SCR do jednoho celku. Dodavatelem je belgická firma Diesel Emission Control (DEC), schéma systému je patrné z Obr. 9.



Obr. 9 Návrh schématu rozmístění a zapojení komponentů od firmy DEC pro výfukový systém motoru Z1606



4 VYMEZENÍ CÍLŮ DISERTAČNÍ PRÁCE

Hlavní cíle disertační práce lze popsat následujícími body:

- Navržení systému úpravy výfukových plynů s cílem dosažení emisních limitů daných 97/68/EC ve stupni STAGE 4,
- experimentální ověření navržených systémů,
- vyvození důsledků a zobecnění na základě experimentů
- optimalizace systému na základě experimentů.

Pro úspěšné splnění výše zmíněných bodů se předpokládá splnění následujících dílčích úkolů:

- Navržení základních rozměrů systému dodatečné úpravy výfukových plynů zahrnující detailní porozumění problematiky, zvolení vhodné koncepce, zpracování konstrukční dokumentace na stavbu funkčního vzorku a poté i prototypu.
- Stavba funkčního vzorku zahrnující vytipování vhodného motoru s emisními parametry pro dosažení emisního stupně STAGE 4, zástavbu aftertreatmentu v motorovém boxu a osazení funkčního vzorku potřebnými čidly a snímači.
- Experimentální zkoušky na motorové brzdě vhodně vybavené zkušebny, hlavně co se týká analyzátorů výfukových plynů, zpracování metodiky experimentů pro dosažení požadovaných cílů, vyhodnocení získaných výsledků s cílem pro zobecnění a navržení nových postupů pro dosažení požadovaného limitu emisí.



5 ASISTOVANÁ REGENERACE DPF FILTRU

5.1 NÁVRH SYSTÉMU SLEDOVÁNÍ STAVU ZANESENÍ DPF FILTRU

Z důvodů zabezpečení průchodnosti DPF filtru je nutné, aby řídicí jednotka EAT systému stále hlídala stav zanesení DPF filtru. Jako jedno z možných řešení je zavedení tzv. indexu zanesení SLI , který je funkcí:

$$SLI = f\left[\left(\frac{G_{exh}}{F_{size}}\right), P\right] \quad (7)$$

a jednotlivé členy rovnice lze stanovit [11]:

$$G_{exh} = G_{fuel} + G_{air} \quad (8)$$

$$G_{fuel} = \frac{3 \times V_p \times n \times i}{100000} \quad (9)$$

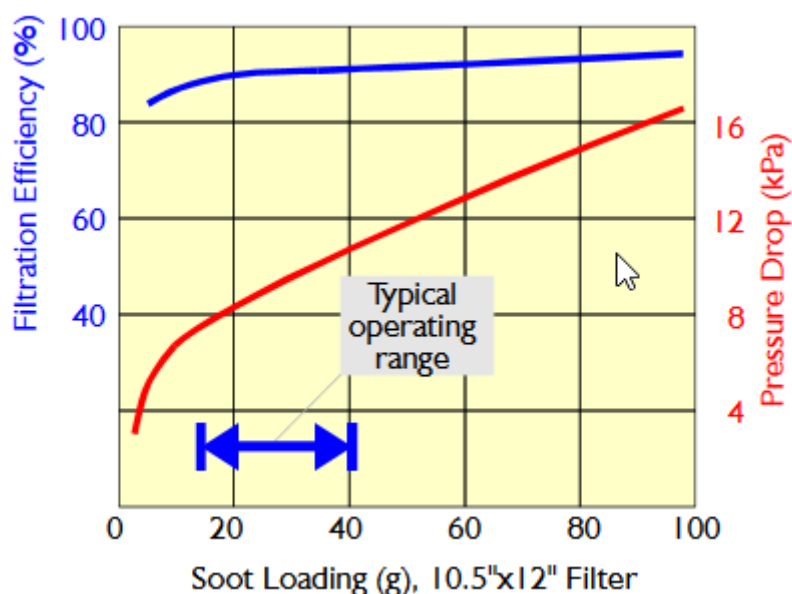
kde V_p [mg/cykl] je dávka vstřikovaného paliva do válce, n [1/min] jsou otáčky motoru a i je počet válců motoru.

Velikost DPF filtru byla zvolena na základě podobných motorů [12]. A dále pak dle podkladů firem dodávající základní substrát např. Nett Technologies Inc. [13].

Table 2 DPF lineup

Notation	Engine	Volume (ℓ)	Muffler Size (mm)	New DPF (300cps)	
				Filter Size	Body Size
KCM-1	3D84	1.5	$\phi 150 \times 380$	$\phi 5.66'' \times 5''$	$\phi 156 \times 375$
KCM-1	4D84	2.0	$\phi 170 \times 465$	$\phi 5.66'' \times 5''$	$\phi 156 \times 450$
KCM-3	4D95	3.3	$\phi 220 \times 450$	$\phi 7.5'' \times 7''$	$\phi 203 \times 450$
KCM-4	4D102	3.9	$\phi 220 \times 600$	$\phi 9'' \times 7''$	$\phi 241 \times 450$
KCM-5	6D102	5.9	$\phi 280 \times 525$	$\phi 12'' \times 7''$	$\phi 318 \times 525$
KCM-6	6D114	7.2	$\phi 280 \times 675$	$\phi 12'' \times 9''$	$\phi 318 \times 700$
KCM-7	6D125	11.0	$\phi 280 \times 800$	$\phi 12'' \times 12''$	$\phi 318 \times 700$
KCM-8	6D140	15.2	$\phi 340 \times 800$	$\phi 12'' \times 14''$	$\phi 318 \times 775$
KCM-10	6D170	23.2	$\phi 460 \times 700$	2 – $\phi 12'' \times 12''$	$318 \times 697 \times 800$

Obr. 10 Katalog velikostí DPF filtrů firmy Komatsu [12]



Obr. 11 Závislost filtrační účinnosti DPF filtru na velikosti filtru a prottlaku filtru [13]

V následujících tabulkách (Obr.12,13) je výtažek z katalogu firmy Nett Technologies Inc. [13] dodávající substráty na bázi cordieritu nebo silicon karbidu. Pro naše vzorky byl jako základ brán cordierit na základě dobrých zkušeností z emisního stupně STAGE 3B. Firma Nett Technologies Inc. [13] má i doporučení velikosti DPF filtru dle výkonu.

Model	Overall Dimensions			
	Diameter		Length	
	inch	mm	inch	mm
SG502	6.2	157	14.8	376
SG705	8.1	206	18.5	470
SG706	8.1	206	19.5	495
SG707	8.1	206	20.5	521
SG709	8.1	206	22.5	572
SG910	9.6	244	23.5	597
SG913	9.6	244	25.5	648
SG914	10.1	257	26.1	663
SG1014	11.1	282	24.7	627
SG1017	11.1	282	26.7	678
SG1116	11.9	302	26.6	676
SG1120	11.9	302	28.6	726
SG1123	11.9	302	30.6	777
SG1226	12.7	323	30.6	777
SG1228	12.7	323	31.6	803
SG1337	13.7	348	34.5	876
SG1543	15.7	399	34.2	869
SG1863	18.7	475	36.3	922
SG2077	20.7	526	38.2	970

Obr. 12 Katalog velikostí substrátu firmy Nett Technologies Inc. [13]



Model*	Max. Engine Power *	
	hp	kW
SG502	33	25
SG705	75	56
SG706	85	64
SG707	94	71
SG709	113	85
SG910	135	101
SG913	162	121
SG914	181	135
SG1014	184	138
SG1017	221	165
SG1116	211	158
SG1120	254	190
SG1123	296	221
SG1226	336	251
SG1228	360	269
SG1337	479	358
SG1543	563	420
SG1863	810	605
SG2077	1000	746

* The max. power applies to engines with engine-out PM of 0.05g/bhp-hr

Obr. 13 Katalog velikostí substrátu dle výkonu motoru firmy Nett Technologies Inc. [13]

Řídicí jednotka aftertreatmentu vypočítává množství zanesení sazí SLI (soot load index) ke sledování stavu zanesení DPF filtru. ECU nepřetržitě monitoruje stav filtru za všech provozních podmínek. SLI je výsledek výpočtu množství výfukových plynů a protitlaku aftertreatmentu. Velikost protitlaku aftertreatmentu je přímo úměrná zanesení DPF filtru. Další proměnná, která do velikosti protitlaku vstupuje, je teplota. Na základě provedených měření byla stanovena korelační tabulka. Z provedených měření se ukazuje, že se vzrůstající teplotou výfukových plynů roste i protitlak aftertreatmentu, aniž by došlo ke zvýšenému zanesení DPF filtru. Vztah množství výfukových plynů, protitlaku a teploty je popsán vyhledávací tabulkou v řídicí jednotce aftertreatmentu. Tato tabulka byla doplněna na základě měření na brzdě motoru v zatěžovacích charakteristikách motoru při různých stupních zanesení DPF filtru.



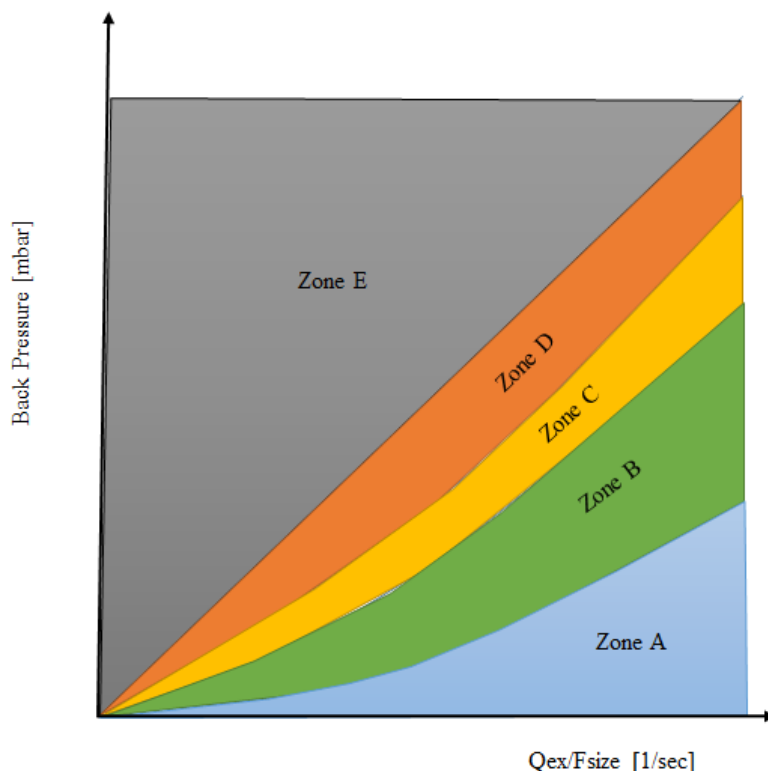
Hlavní výhodou použití SLI je, že řídicí jednotka dokáže bez problémů měřit zanesení DPF filtru za všech provozních podmínek. Ukazuje se jako výhodné zobrazovat stav SLI na přístrojové desce.

Pro zjištění zanesení filtru je nutné, aby řídicí jednotka zpracovávala rozdíl tlaku za DOC snímačem tlaku (P1) vůči atmosférickému tlaku. Objem DPF filtru je nastaven v řídicí jednotce jako konstantní. Z výše popsanych informací ECU vypočítá SLI.

Osa X viz. Obr 14 mapy SLI je průtok výfukových plynů za sekundu dělená objemem filtru v jednotkách (1/s). Odpovídající pokles tlaku je znázorněn na ose Y v mapě (bar). Výsledná hodnota v konkrétním provozním bodě motoru je SOOT LOAD INDEX (SLI).

Na základě porovnání protitlaku a relativního průtoku výfukových plynů přes filtr je mapa SLI viz. Obr 13 rozdělena do 5 zón – A, B, C, D a E.

- Zóna A – poškozený DPF.
- Zóna B – normální provoz. Žádná regenerace není potřeba.
- Zóna C – normální provoz. Regenerace je zapotřebí.
- Zóna D – zanesení filtru je vysoké. Naléhavá potřeba regenerace.
- Zóna E – zanesení filtru je příliš vysoké. Je nutné provést mechanické vyčištění filtru. Regenerace není povolena.



Obr. 14 Mapa SLI [11]



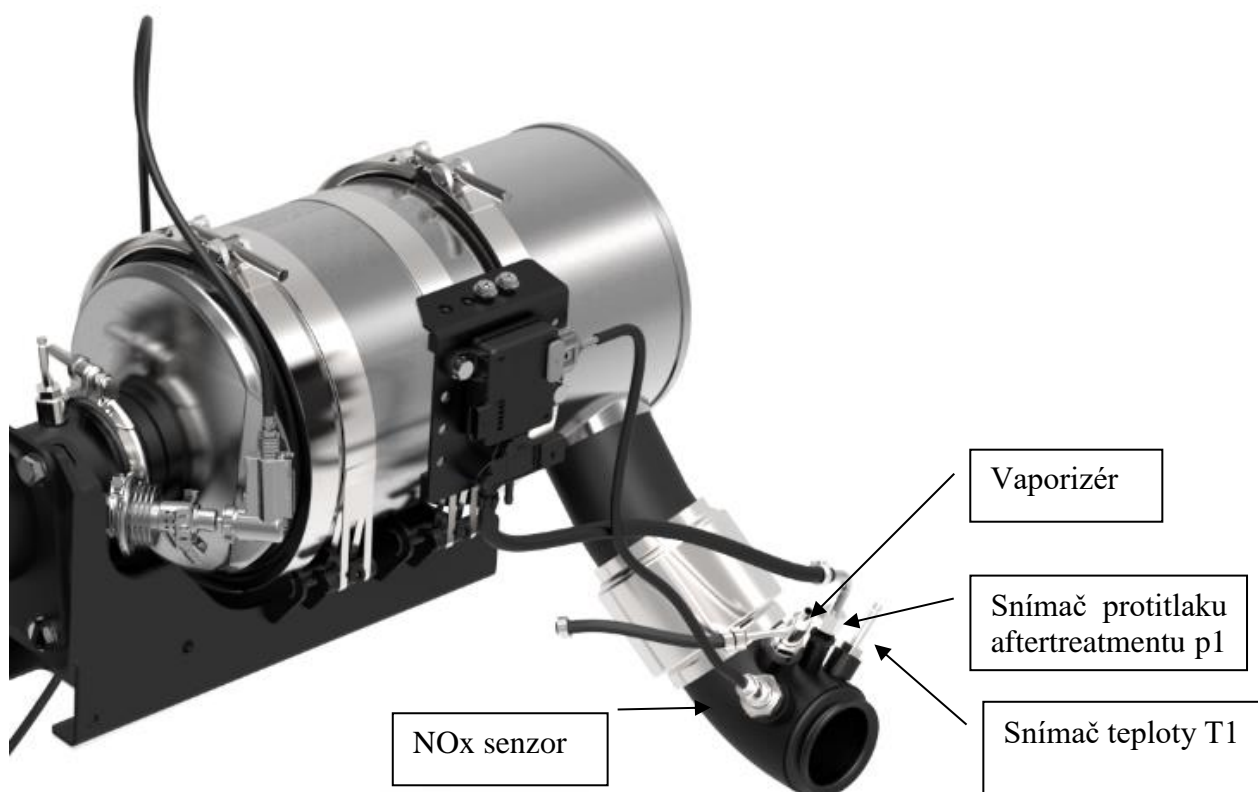
Na základě zkoušek se ukázalo, že 1 sekundové čtení mapy SLI je dostačující. Hodnota SLI je zprůměrnována a uložena do dvou proměnných:

- SLI60 – SLI v průměru za 60 sekund
- SLI 300 – SLI v průměru za 300 sekund

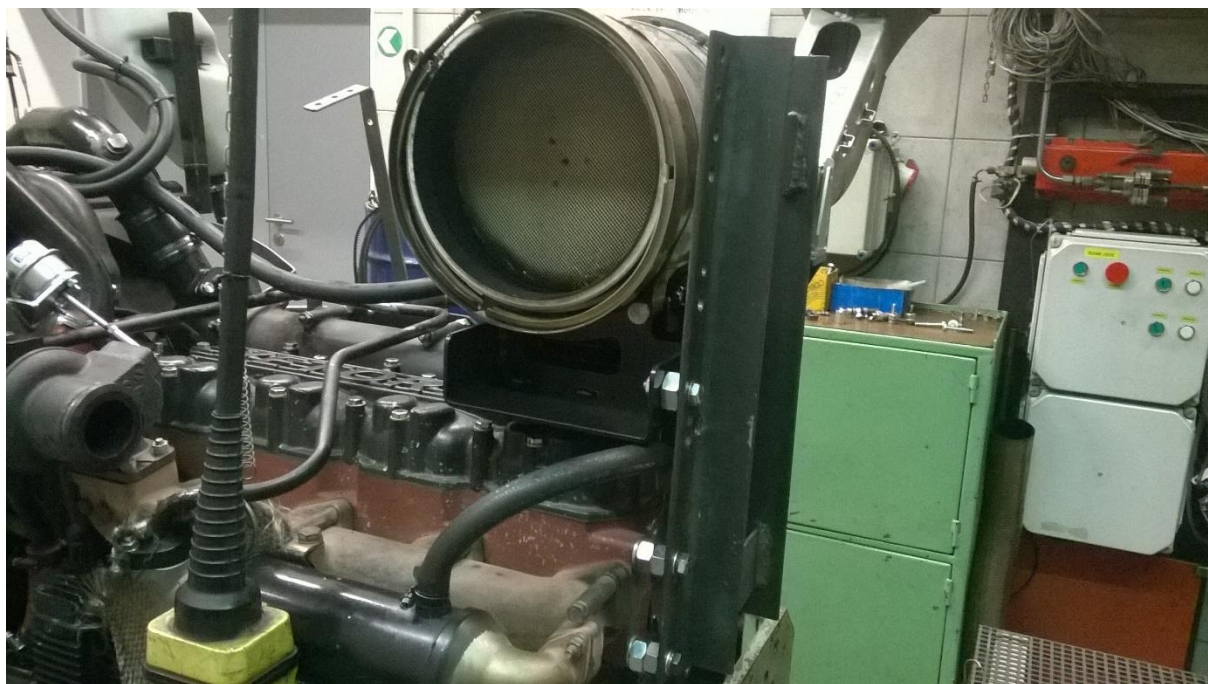
Asistovaná pasivní regenerace je řízena pomocí SLI60. Diagnostika filtru je dle SLI 300.

5.2 REGENERACE DPF FILTRU

Asistovaná regenerace DPF filtru je spuštěna tak, jak již bylo uvedeno na základě SLI indexu nebo na základě časového intervalu. Doba regenerace byla na základě zkoušek na 10 minut. Asistovaná regenerace zahrnuje dávkovací čerpadlo v kombinaci s naftovým výparníkem (vaporizér) umístěným před oxidačním katalyzátorem (DOC). Když se motorová nafta dostane do kontaktu s DOC katalyzátorem, na tomto katalyzátoru dochází k exotermní reakci, která zvyšuje teplotu v DPF filtru, a to tak, že oxiduje zachycené saze.



Obr. 15 DOC a DPF katalyzátor s vaporizérem pro asistovanou regeneraci



Obr. 16 Pohled na matici DPF filtru namontovaného na motoru

Tab. 4 Specifikace DPF filtru

Typ katalyzátoru	DPF
Substrát DPF filtru	CORDIERITE wall flow, 200 cpsi symmetric
Počet substrátových bloků	1
Rozměr substrátu DPF filtru	Ø9" x 6" (229x152mm)
Celkový objem DPF filtru	6,255 litru
Washcoat Material	10 g/ft ³
Washcoat Composition	1:0:0
Maximální dovolená teplota	750°C
Prodleva DPF filtru	0,018 s (při 500°C a průtoku výf. plynů 600kg/h)

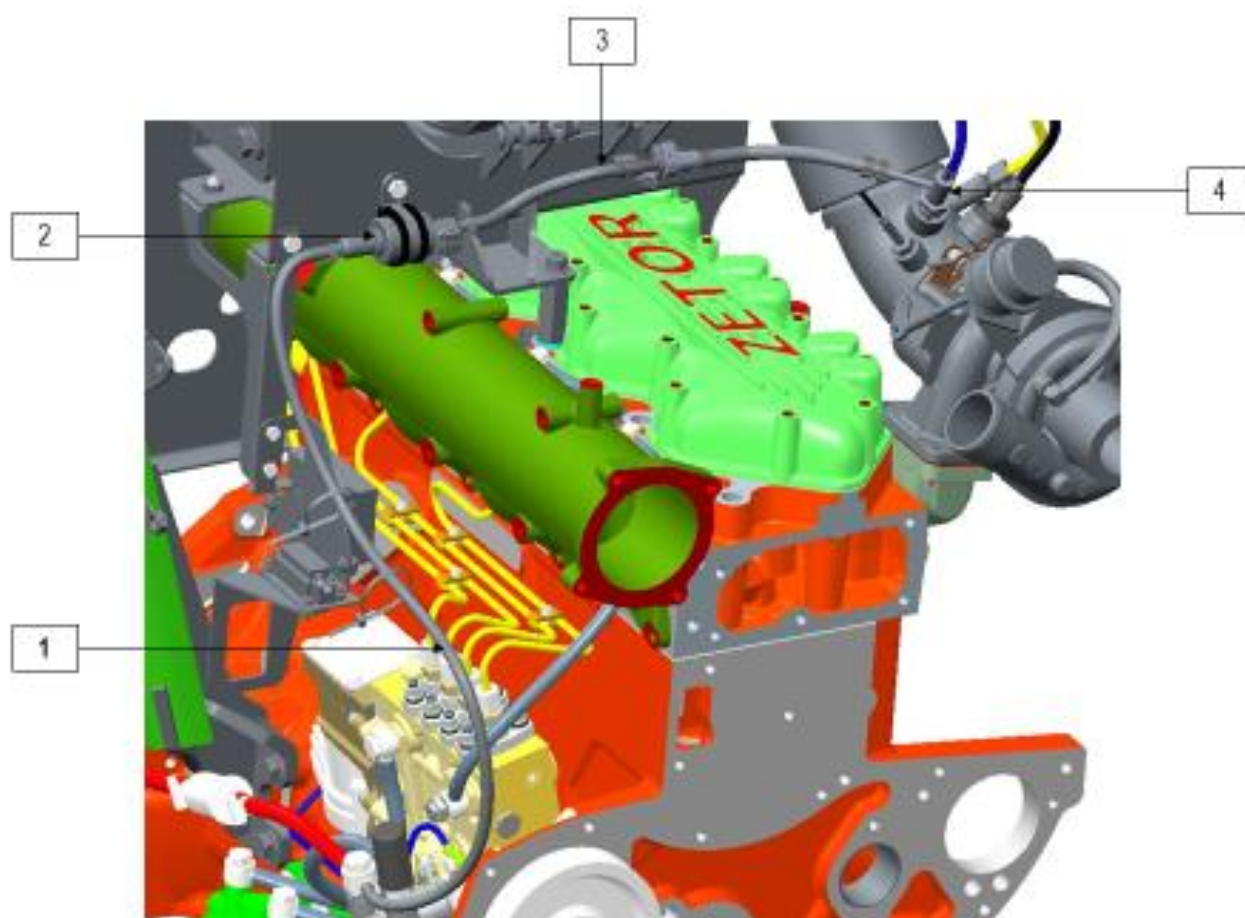
*Tab. 5 Specifikace DOC katalyzátoru*

Typ katalyzátoru	DOC
Substrát DOC katalyzátoru	Kovový, vlnitý, plně průtočný
Počet substrátových bloků	1
Rozměr substrátu DOC katalyzátoru	ø6,9"x 5,9" (175 mm x 150 mm)
Celkový objem DOC katalyzátoru	3,113 litru
Washcoat Materiál-Sycení	50 g/ft ³
Washcoat Composition-poměr sycení	3:1:0
Maximální dovolená teplota	750°C
Prodleva DOC katalyzátoru	0,009 (při 500°C a průtoku výf. plynů 600kg/h)



5.3 VÝPARNÍK NAFTY PRO ASISTOVANOU REGENERACI - VAPORIZÉR

Systém naftového výparníku - vaporizéru má za úkol vstřikování motorové nafty přímo před DOC katalyzátor. Systém je napájen ze sací strany nafty vstřikovacího čerpadla. Systém zahrnuje součásti dle Obr. 17.



Obr. 17 Zapojení vaporizéru pro asistovanou regeneraci (1–hadice pro přívod nafty, 2–dávkovací čerpadlo na naftu, 3–tlaková hadice, 4–tryska pro vstřikování nafty s odpařovačem - Vaporizér)



Dávkovací čerpadlo dodává do vaporizéru přesně definované množství nafty.



Obr. 18 Dávkovací čerpadlo

Motorová nafta se odpařuje pomocí ohřívače v trysce. Naftový výparník - vaporizér je přišroubován přímo do sacího potrubí DOC katalyzátoru.



Obr. 19 Vaporizér



5.4 VÝPOČET MNOŽSTVÍ VSTŘIKOVANÉ NAFTY POTŘEBNÉ PRO REGENERACE DPF FILTRU

Množství vstřikované nafty vychází z prvního zákona termomechaniky.

$$Q = \Delta U + A_v \quad (10)$$

$$dQ = m \cdot c_p \cdot dT - V \cdot dp \quad (11)$$

Na základě prvního zákona termomechaniky lze pro izobarický děj odvodit rovnici pro vstřikované množství nafty. Potřebnou energii pro zvýšení teploty výfukových plynů lze vypočítat:

$$IDQ_{Basic} = \frac{(G_{in} \cdot R_{VolMassEx} \cdot Heat_{CapEx} \cdot (T_{Des} - T_x))}{Heat_D} \quad , \quad (12)$$

$$G_{in} = \frac{G_{air}}{3,6} \quad , \quad (13)$$

Tab. 6 Konstanty pro výpočet vstřikovaného množství nafty pro regeneraci DPF

Konstanty	Hodnota
$R_{VolMassEx}$ [g/l] Hustota výfukových plynů	1.37
T_{Des} [°C] Cílová teplota (požadovaná teplota za DOC/DPF)	560
T_x [°C] Vstupní teplota (je rovna T1)	T1
$Heat_{CapEx}$ [J/gK] Měrná tepelná kapacita nafty	1.12
$Heat_D$ [J/uL] Výhřevnost	38



Skutečná hodnota vstřikovaného množství bude korigována na základě korekčních faktorů pro jednotlivé teploty systému.

$$IDQ = IDQ_{Basic} \cdot (ID_{CorT1} \cdot ID_{CorT2} \cdot ID_{CorT3} \cdot ID_{CorT4}) \quad (14)$$

Korekční hodnoty byly poskytnuty dodavatelem aftertreatmentu firmou DEC.

TempT1		TempT2		TempT3		TempT4	
Temp °C	Correction	Temp °C	Correction	Temp °C	Correction	Temp °C	Correction
0	0	170	0	170	0,2	10	1
200	0	180	0,3	180	0,5	20	1
230	0	200	0,5	200	0,8	210	1
240	1	210	0,8	210	0,8	260	1
250	1	220	0,9	290	0,8	280	1
255	1	230	1	300	0,9	510	1
265	1	320	1	350	0,9	515	1
270	1	350	1	380	1	520	1
275	1	400	1,1	450	1,1	525	1
280	1	500	1,1	500	1,2	530	0,9
290	1	535	1,1	535	1,1	535	0,9
300	1	540	1,1	540	1	540	0,6
310	1	550	1,1	545	0,9	545	0,6
320	1	555	1,1	550	0,8	550	0,3
330	1	560	1	550	0,8	555	0
340	1	570	1	570	0,6	560	0
350	1	575	0,9	580	0,3	565	0
360	1	580	0,8	590	0,4	570	0
370	1	590	0,6	600	0	575	0
500	1	600	0,5	610	0	580	0

Obr. 20 Korekční hodnoty ID_{CorT1} , ID_{CorT2} , ID_{CorT3} , ID_{CorT4} [11]

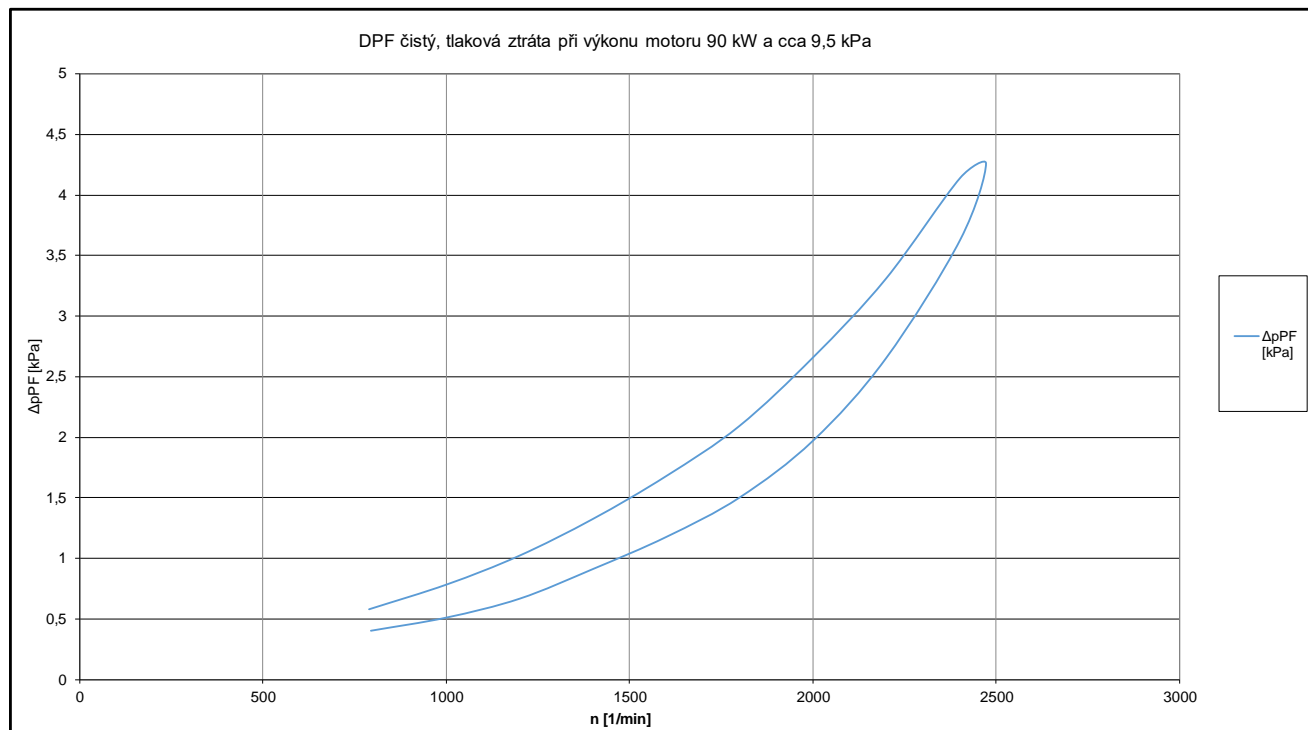


5.5 OVĚŘENÍ REGENERACÍ NA MOTOROVÉ BRZDĚ

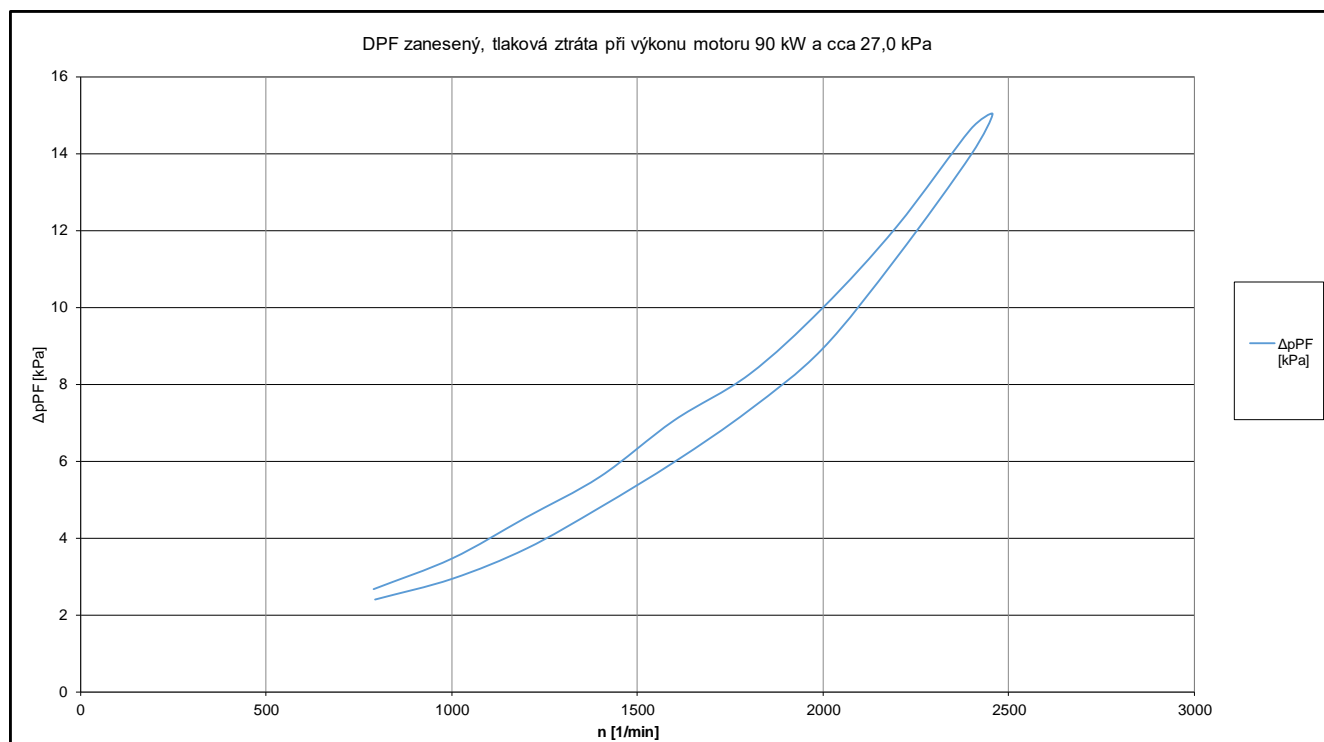
Měření regenerací a ověření regeneračních schopností systému bylo nejdříve ověřeno na motorové brzdě. Dále byl sledován vliv protitlaku v důsledku zanášení DPF filtru na parametry motoru.

Tab. 7 Vliv zanesení DPF filtru na parametry motoru

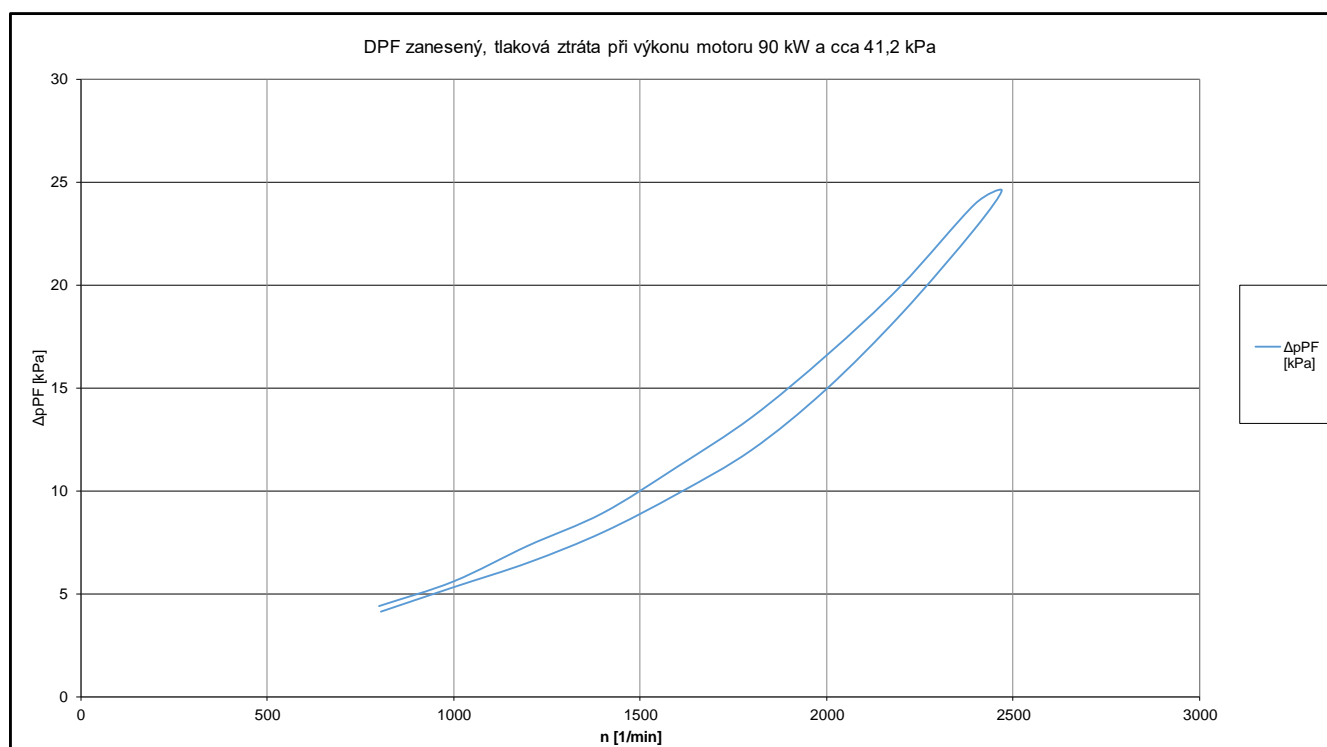
Varianta	Odpor _{PF}	Pe	m _{pe}	V _p	t _{2T}	p _{0T}	p _{2K}	G _{in}	Poznámka
	[kPa]	[kW]	[g/kWh]	[mg]	[°C]	[mmHg]	[mmHg]	[g/s]	
A	9,56	92,7	251,6	88,2	472	2140	1382	169	PF po regeneraci
B	27,00	88,8	258,6	86,9	488	2271	1364	164	Nutnost regenerace
C	41,23	88,1	261,4	87,0	porucha	2393	1337	164	Nepříjemný stav PF



Obr. 21 Závislost průtokového odporu DPF měřeno před filtračním elementem - varianta A
Tab.7

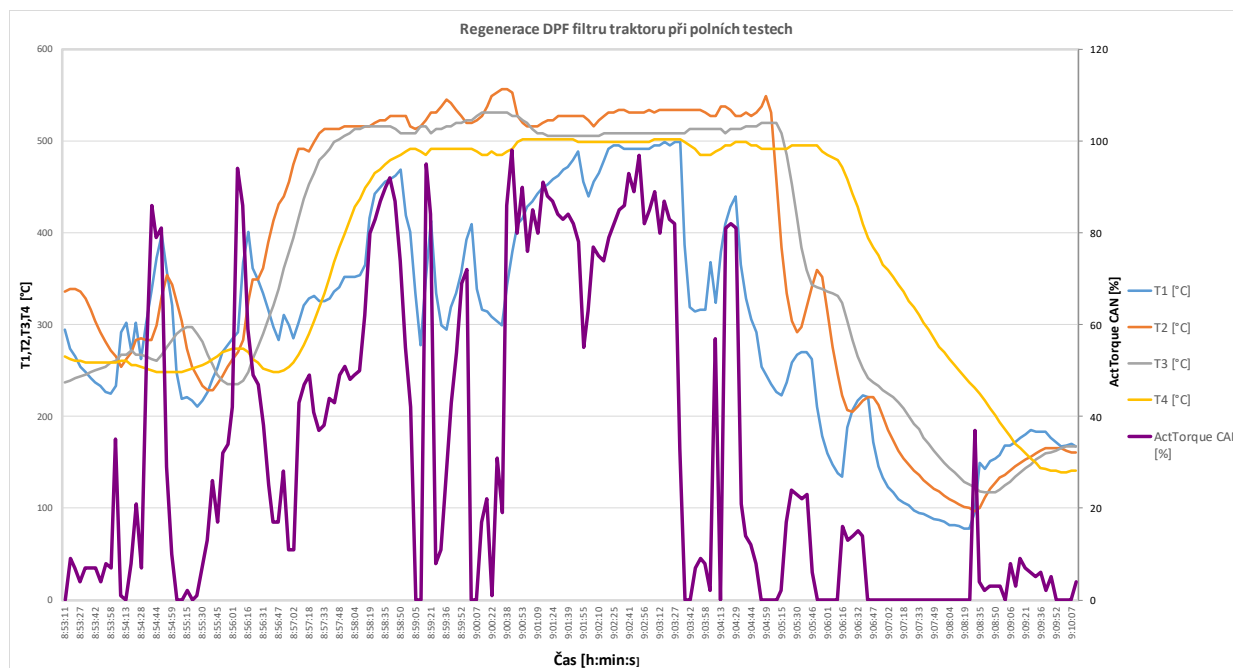


Obr. 22 Závislost průtokového odporu DPF měřeno před filtračním elementem - varianta B
Tab.7

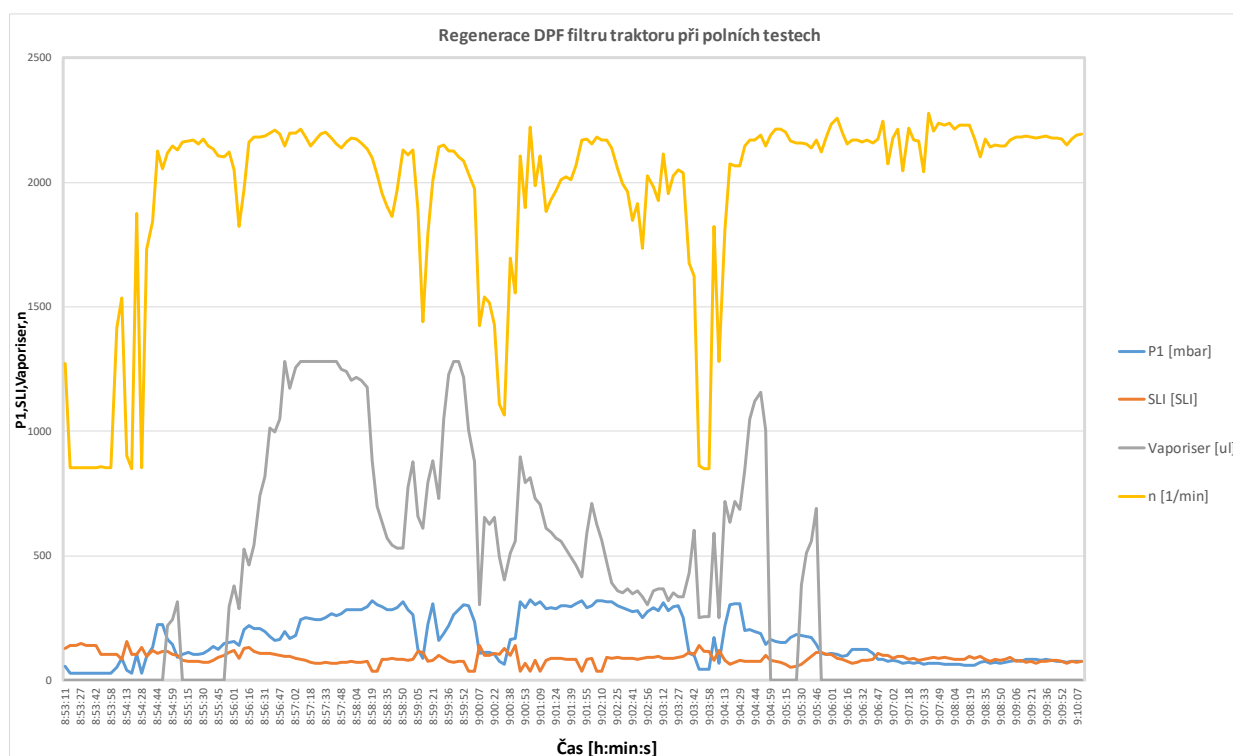


Obr. 23 Závislost průtokového odporu DPF měřeno před filtračním elementem - varianta C
Tab. 7

Funkční ověření na traktoru již bylo prováděno za provozu traktoru. Jak je ze záznamů pořízených z CAN informací přímo na traktoru vidět. Vstřikováním nafty před DOC dochází ke značnému zvýšení teploty.



Obr. 24 Průběh teplot při regeneraci DPF filtru při polních testech traktoru



Obr. 25 Průběh tlaku, SLI, množství vstříkované nafty při regeneraci DPF filtru při polních testech traktoru



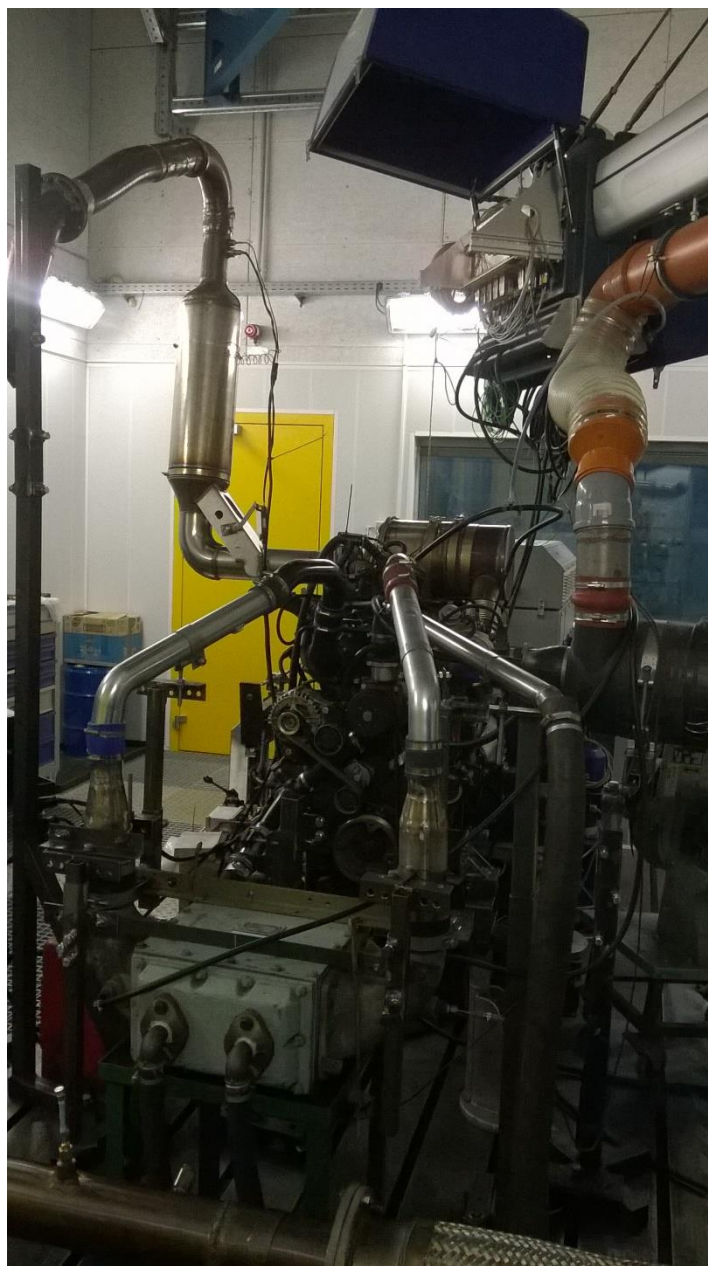
6 SCR KATALYZÁTOR

6.1 NÁVRH SYSTÉMU SCR

Selektivní katalytická redukce využívá směs amoniaku (NH_3) a demineralizované vody ke snížení oxidů dusíku (NO_x) za vzniku dusíku (N_2), vodní páry (H_2O) a oxidu uhličitého (CO_2). Katalyzátor se skládá ze dvou matic s vanadiovým povlakem. Poslední matrice je opatřena platinou pro oxidaci amoniaku (AMOX), který nezreagoval na předchozích dvou maticích a unikl by do ovzduší. Systém SCR je velmi účinný - až 95% při teplotách výfukových plynů 220°C až 550°C [6]. NH_3 ve formě 32.5% roztoku močoviny a demineralizované vody (obchodní název AdBlue) se vstřikuje před SCR katalyzátor. Konstrukční návrh vznikl ve spolupráci s firmou DEC. Při konstrukci byly respektovány nejen předpoklady pro správnou funkci systému, ale i zástavbové možnosti použití do traktoru. Při konstrukčních návrzích byla plněna i další homologační podmínka pro zástavbu v traktorech a to je dodržení zorného výhledového pole řidiče dle směrnice 2008/2/EC. Zástavba dle směrnice 2008/2/EC byla změřena. Výsledky jsou uvedeny v závěru.



Obr. 26 SCR katalyzátor



Obr. 27 Zástavba SCR katalyzátoru na motoru na brzdě TÜV SÜD



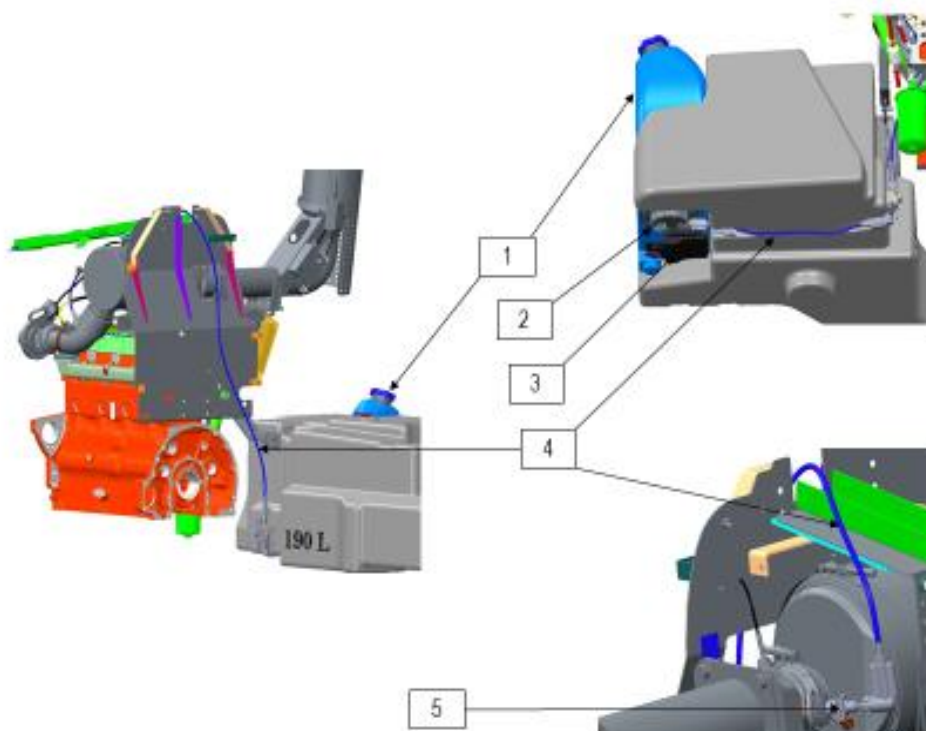
Tab. 8 Specifikace SCR katalyzátoru

Typ katalyzátoru	SCR (Selective Catalytic Reduction catalyst) + AMOX (Ammonia Oxidation Catalyst)
Catalyst Substrate Material	Corrugated TiO ₂ , plně průtočný
Počet matic	2
Rozměr matrice	ø7.5"x 10.5" (190 mm x 266.7mm)
Celkový objem katalyzátoru	15,2 L
Objem SCR katalyzátoru	12,3 L
Objem AMOX katalyzátoru	2,9 L
SCR Stage Washcoat Material	V ₂ O ₅ , WO ₃ , (TiO ₂ bulk material)
SCR Stage Washcoat Composition	V ₂ O ₅ = 2%, 252,0 g/ft ³ WO ₃ = 7 % 882,1 g/ft ³
Maximální dovolená teplota	550°C
Prodleva SCR katalyzátoru	0,04 s (při 500°C a průtoku výf. plynů 600kg/h)
AMOX Stage Washcoat Material	Pt (TiO ₂ bulk material)
AMOX Stage Washcoat Composition	2200 mg/ft ³

6.2 DÁVKOVACÍ SYSTÉM MOČOVINY

Dávkovací systém pro močovinu se skládá z nádrže pro močovinu a potrubí, dávkovacího modulu, dávkovací jednotky, směšovacího zařízení a řídicí jednotky. Když jsou splněny vstupní podmínky pro dávkování (hlavně teplota výfukových plynů přes 220°C). Řídicí jednotka poté řídí dávky činidla. Řídicí jednotka navíc monitoruje celý systém a provádí diagnostiku. Zároveň chrání SCR před možným poškozením.

Fyzická dodávka roztoku močoviny do SCR se provádí dávkovacím systémem složeném z komponent viz. Obr. 28.



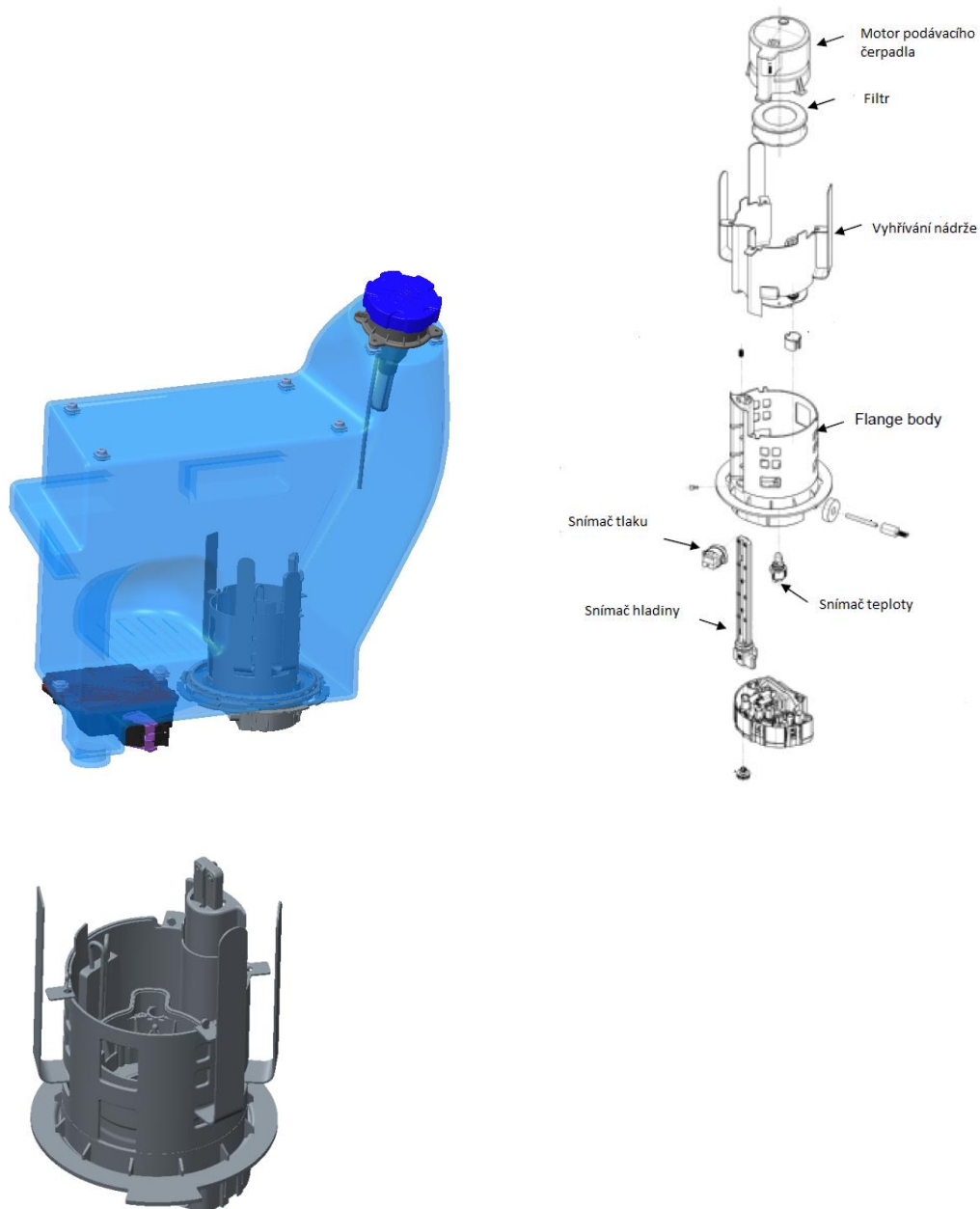
11

Obr. 28 Návrh dávkovacího modulu SCR systému (1– nádrž na roztok močoviny, 2– řídicí jednotka, 3– řadič řídicí jednotky, 4– vyhřívané hadice na roztok močoviny, 5-vstříkovač močoviny)



6.3 NÁDRŽ MOČOVINY A PODÁVACÍ SYSTÉM

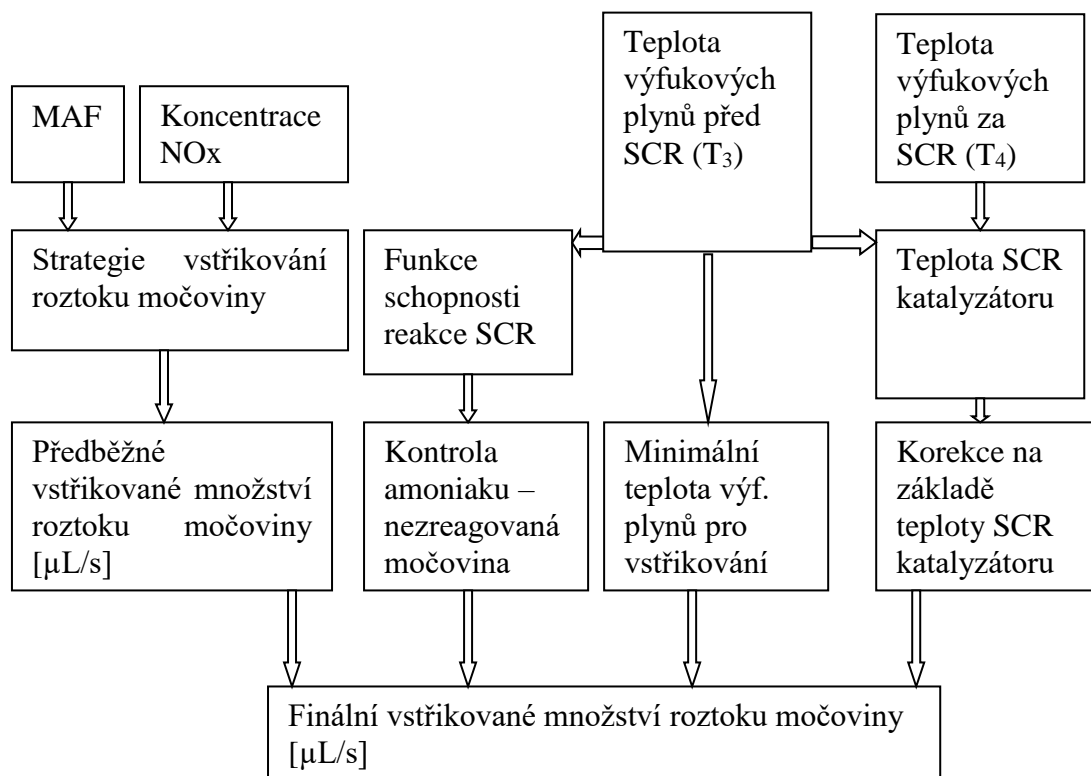
Nádrž na roztok močoviny je plastový s kovovými zámkami pro čerpadlo. Nádrž musí být opatřena speciálním plnicím víčkem s odvzdušněním nádrže. Jako standard se používá pro víčko modrá barva. Integrované podávací čerpadlo s rozmrazovacím systémem je připevněno na spodní straně nádrže.



Obr. 29 Podávací čerpadlo s rozmrazovací jednotkou, měřením stavu, filtrací, senzorem teploty

6.4 STRATEGIE VSTŘIKOVÁNÍ MOČOVINY

Primárně se dávkování řídí na základě hmotnostního průtoku vzduchu motoru MAF a dále pak naměřené koncentrace emisí na NOx senzoru umístěném za turbodmychadlem motoru viz Obr. 15. Další dodatečné faktory ovlivňující dávkování jsou teplota výfukových plynů jednoznačně určující účinnost katalytické reakce a dále pak kvalita močoviny. NOx senzor umístěný na konci SRC katalyzátoru se nevyužívá k ovládání dávkování roztoku močoviny, používá se pouze pro diagnostické sledování a následně pro případné vyvolání režimů omezení dle legislativy. Schéma řízení Obr. 30 [15]



Obr. 30 Schéma strategie vstřikování močoviny [15]



6.4.1 VÝPOČET MNOŽSTVÍ VSTŘIKOVANÉ MOČOVINY

Množství vstřikované močoviny je závislé na těchto snímaných parametrech motoru:

- Množství nasávaného vzduchu (MAF)
- Množství a koncentrace NO_x ve výfukových plynech motoru
- Koncentrace a kvalita vstřikované močoviny
- Teplota výfukových plynů na vstupu do SCR katalyzátoru
- Teplota výfukových plynů za SCR katalyzátorem

A dále pak

- Hustotu močoviny
- Molární množství CO₂
- Hustota nasávaného vzduchu

Základní množství vstřikované močoviny IUQ_{BASIC} je počítáno pro virtuální 100% účinnost selektivní katalytické redukce.

Výpočet se provádí následovně [14] :

$$NH_3[ppm] = \frac{\frac{DEF[\frac{g}{h}] \times \rho_{moc} \times 2}{M_{H_4N_2CO}}}{\frac{m_{exh} \times 1000}{M_{exh}}} \times 10^6, \quad (15)$$

Ze základního vztahu (14) lze odvodit základní množství vstřikované močoviny:

$$NO_x[ppm] = \frac{\frac{IUQ_{BASIC}[\frac{g}{h}] \times \rho_{moc} \times 2}{M_{H_4N_2CO}}}{\frac{G_{exh} \times 1000}{M_{exh}}} \times 10^6, \quad (16)$$

Po úpravě rovnice (15) dostáváme:

$$IUQ_{BASIC}[\mu L/s] = \frac{NO_x[ppm] \times M_{H_4N_2CO}[\frac{g}{mol}] \times G_{exh}[\frac{kg}{h}]}{7200 \times \rho_{moc} \times M_{exh}[\frac{g}{mol}] \times konc_{urea}[-]}, \quad (17)$$

Tab. 9 Konstanty pro výpočet vstřikovaného množství močoviny

Konstanty	Hodnota
ρ_{moc} [kg/l] Hustota močoviny	1,093
$konc_{urea}$ [%] Koncentrace močoviny	32,5
$M_{H_4N_2CO}$ [g/mol] Molární hmotnost močoviny	60,056
M_{exh} [g/mol] Molární hmotnost výfukových	28,8



6.4.2 OMEZUJÍCÍ PARAMETRY VSTŘIKOVANÉHO MNOŽSTVÍ MOČOVINY

- Z důvodů možnosti krystalizace močoviny je nutná korekce vstřikovaného množství v závislosti na nízké teplotě výfukových plynů
- Pro omezení vzniku NH_3 při vysokých teplotách v SCR katalyzátoru je vstřikované množství močoviny mírně zvýšeno
- Dávkování je upraveno podle změn teploty SCR. Při rychle se měnící teplotě katalyzátoru SCR se dávkování zvyšuje nebo snižuje z důvodů kompenzace ukládání amoniaku v ACS.

Finální množství vstřikované močoviny s aplikací korekčních faktorů je následující [15]:

$$IUQ = ANR \cdot IUQ_{Basic} \cdot (\text{Alpha} \cdot \text{CorrSlope} \cdot \text{CorrT2} \cdot \text{CorrT3} \cdot \text{CorrT4}), \quad (18)$$

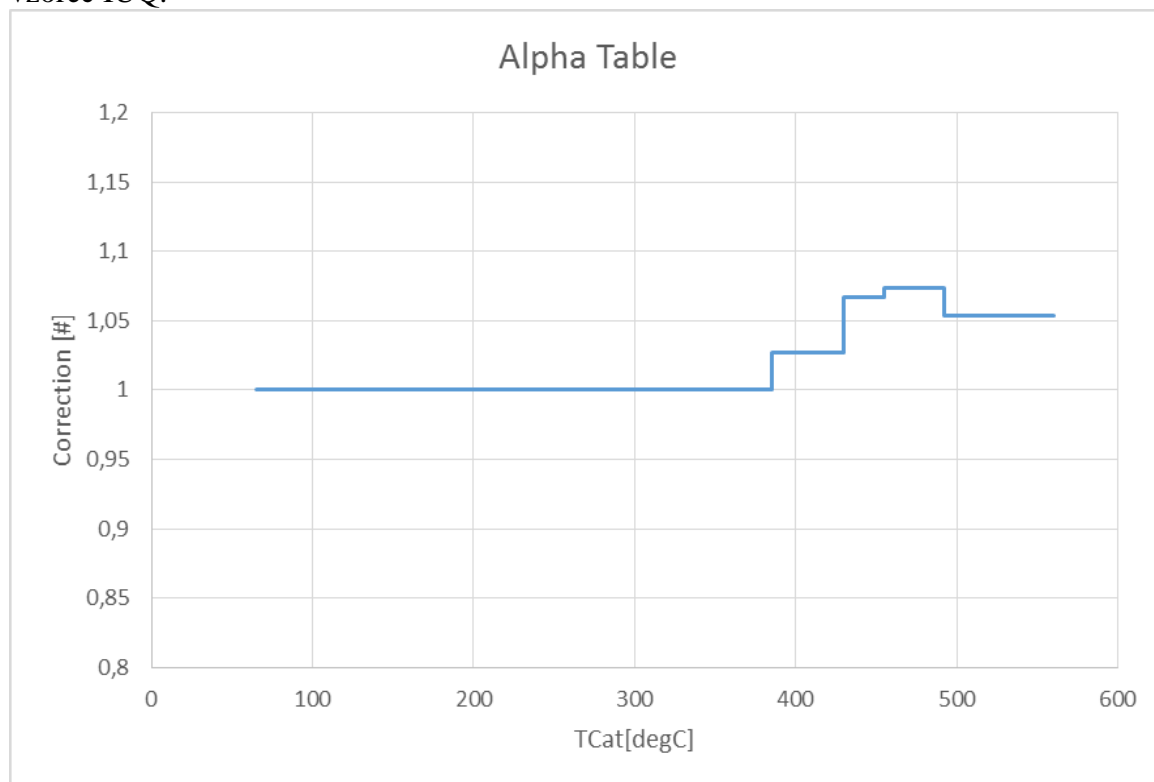
kde $ANR = 1.15$ – korekční faktor dle použitého typu povrchové úpravy (coatingu) SCR katalyzátoru [15].

Alfa je výstup vyhledávací tabulky většinou založený na T_{Cat} (teplota katalyzátoru SCR).

Teplota SCR katalyzátoru se vypočte jako vážený průměr mezi T_3 a T_4 takto [15]:

$$T_{Cat} = T_3 \cdot 0,75 + T_4 \cdot 0,25 \quad (19)$$

Každou sekundu se vypočítá teplota katalyzátoru a příslušná korekční hodnota se aplikuje na vzorec IUQ.



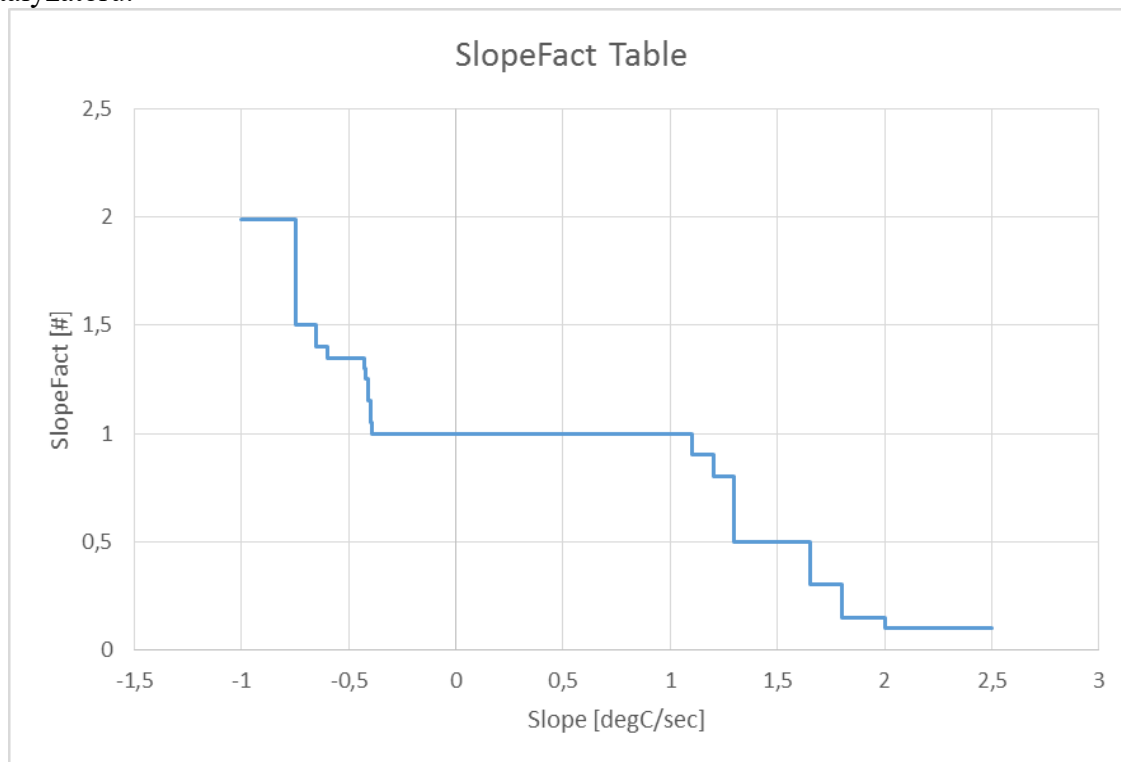
Obr. 31 Alpha korekční tabulka [15]



CorrSlope je počítán jako [15]:

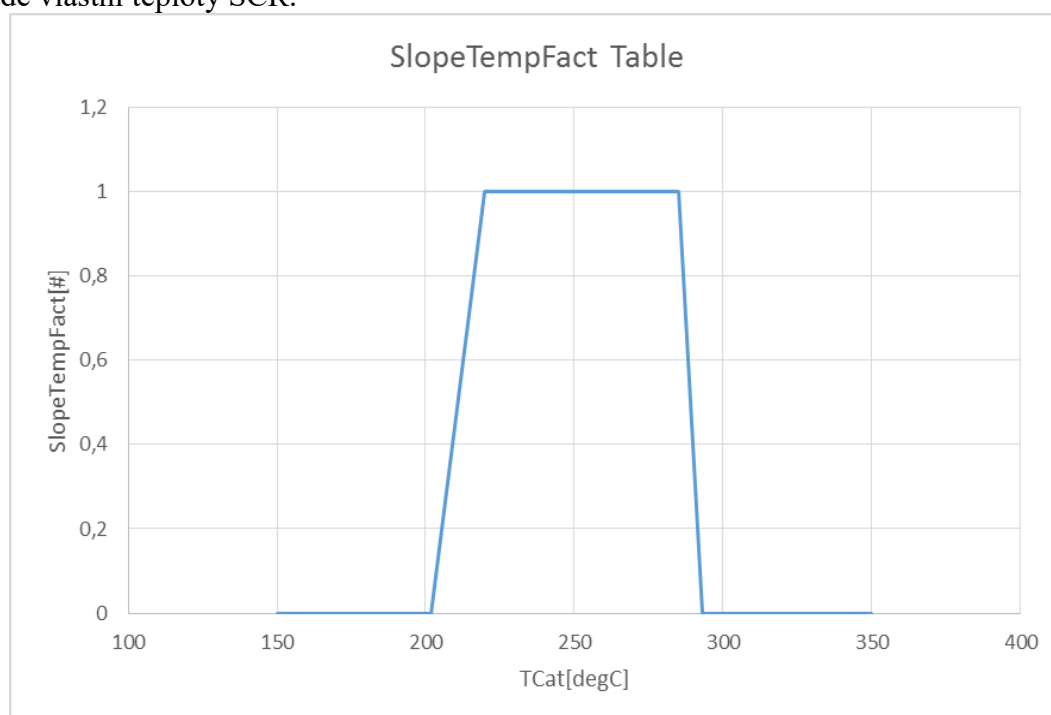
$$\text{CorrSlope} = 100 + (\text{SlopeFact} - 100) \cdot \text{SlopeTempFact} \quad (20)$$

SlopeFact je také získán z vyhledávacího grafu založeného na změně vstupní teploty SCR katalyzátoru.



Obr. 32 CorrSlope korekční tabulka [14]

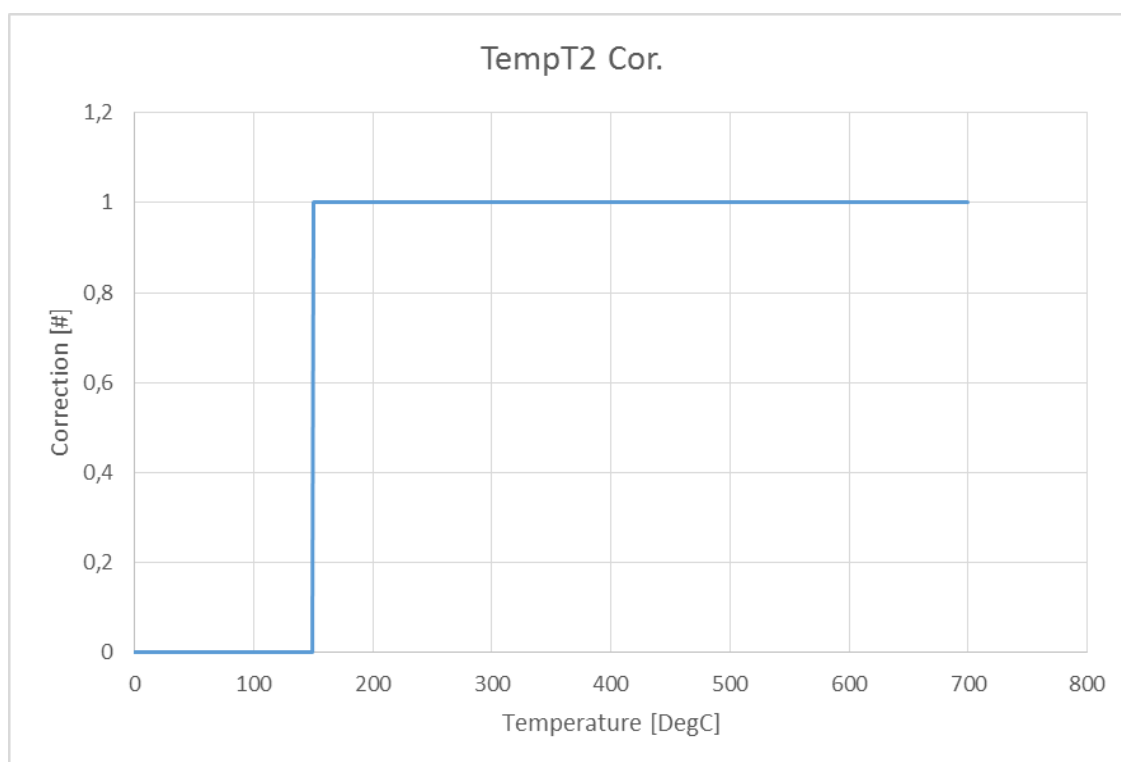
SlopeTempFact je také vybrán z tabulky a definuje vliv rychlosti změny T3 na reakci SCR na základě vlastní teploty SCR.



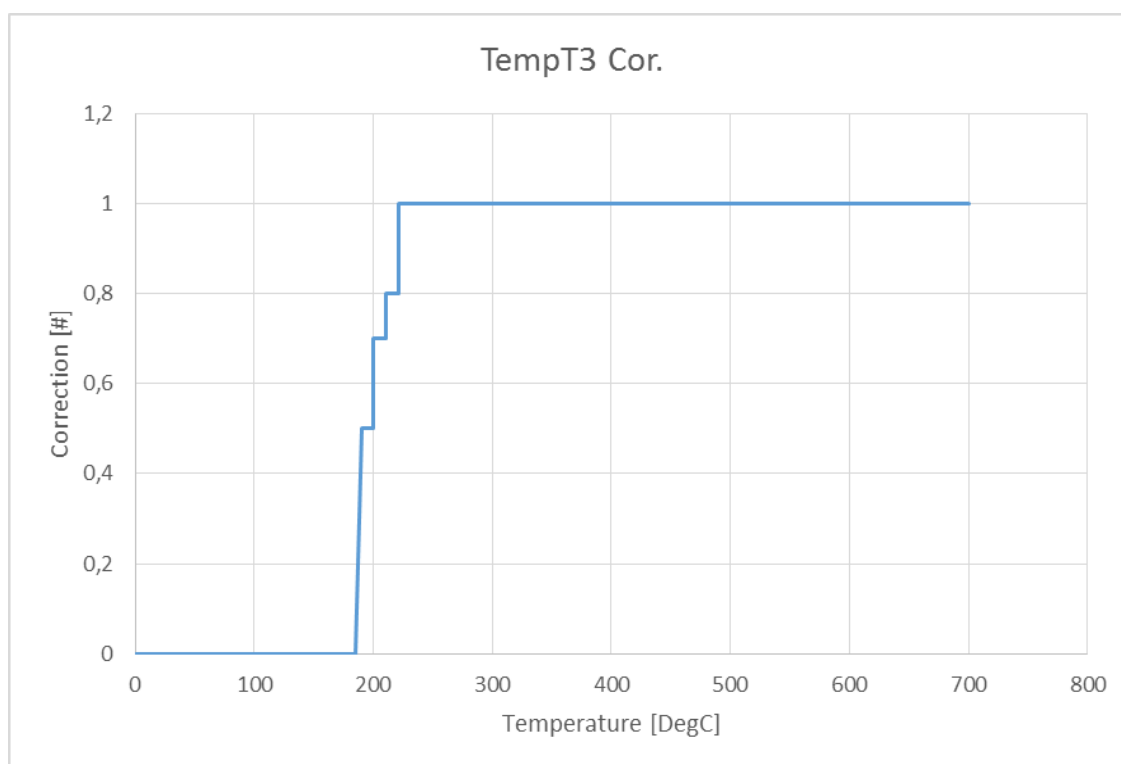
Obr. 33 Faktor pro korekci SlopeTempFact [15]



CorrT2 a CorrT3 jsou korekční faktory na základě teplot T2 a T3.



Obr. 34 CorrT2 korekční tabulka [15]



Obr. 35 CorrT3 korekční tabulka [15]

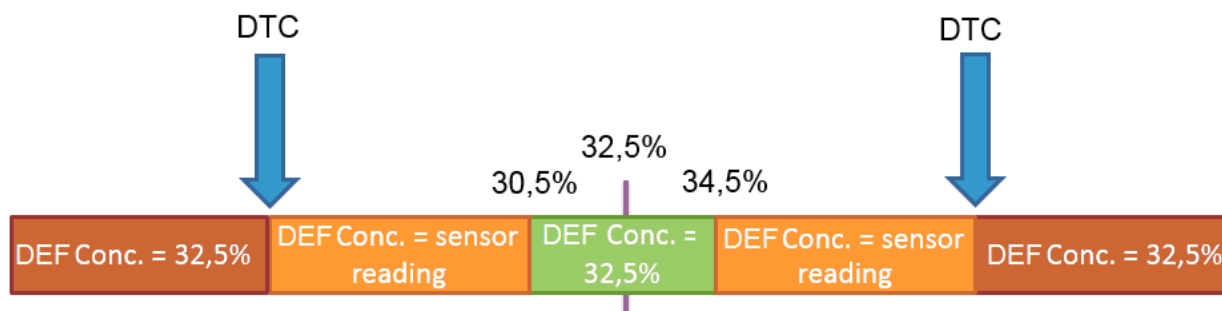


Korekce na základě koncentrace močoviny

Koncentrace močoviny se měří pomocí senzoru kvality močoviny umístěném na vedení močoviny mezi nádrží a vstřikovačem močoviny.

Naměřená hodnota koncentrace močoviny se porovnává s výchozí hodnotou. Pokud je v rozmezí $32,5\% \pm 2\%$ není použita žádná korekce.

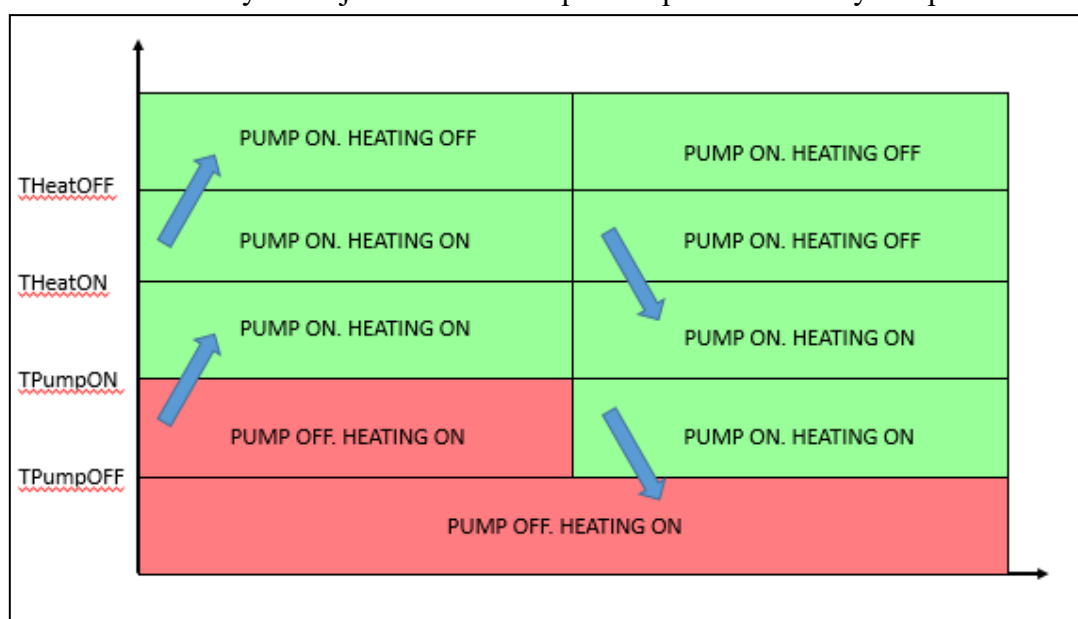
Pokud je naměřená koncentrace 27% až 30,5% nebo 34,5% až 36%, pak se skutečný výpočet dávkování koriguje na základě změřeného vlivu. Pokud je naměřená kvalita močoviny nižší než 27% nebo vyšší než 36%, pak dochází k systému omezení.



Obr. 36 Korekce na základě koncentrace močoviny [15]

Korekce na základě teploty močoviny v nádrži

- Pokud je motor vypnut a teplota okolí klesá pod -7°C , dochází k zamrznutí močoviny. Po spuštění motoru je důležité, aby močovina rozmrzla co nejdříve, aby mohla být vstřikována a systém redukce NOx započal co nejdříve fungovat.
- Systém je nastaven tak, že pokud teplota močoviny nedosahuje teploty -7°C a močovina je v kapalném stavu, systém spouští čerpadlo na močovinu.
- Pokud teplota močoviny v nádrži klesne pod -7°C , řídicí jednotka čerpadla močoviny zapne topné články tak, aby došlo k rozmrznutí močoviny. Po rozmrznutí minimálního množství močoviny řídicí jednotka dává impuls čerpadlu močoviny na spuštění.



Obr. 37 Systém rozmrazování močoviny [15]



Systém vyhřívání a rozmrazování močoviny umožňuje spuštění čerpadla močoviny, jakmile dojde k rozmrazení dostatečného množství močoviny. Není tudíž nutné čekat na rozmrazení celého množství močoviny v nádrži.

Kalibrační tabulka vyhřívání močoviny

Vyhřívání a rozmrazování močoviny je nastaveno dle Tab. 10. Systém při teplotě močoviny -3°C zapíná vyhřívání. Vyhřívání je vypnuto, jestliže teplota močoviny dosáhne 3°C . Dále je řízeno zapnutí čerpadla močoviny. Jestliže je teplota max. -7°C čerpadlo se normálně spíná na základě požadavku jednotky a dle vstřikovaného množství močoviny. Pokud teplota močoviny dosahuje -11°C čerpadlo močoviny je vypnuto do té doby dokud hodnota teploty močoviny nedosáhne -7°C viz. Tab. 10.

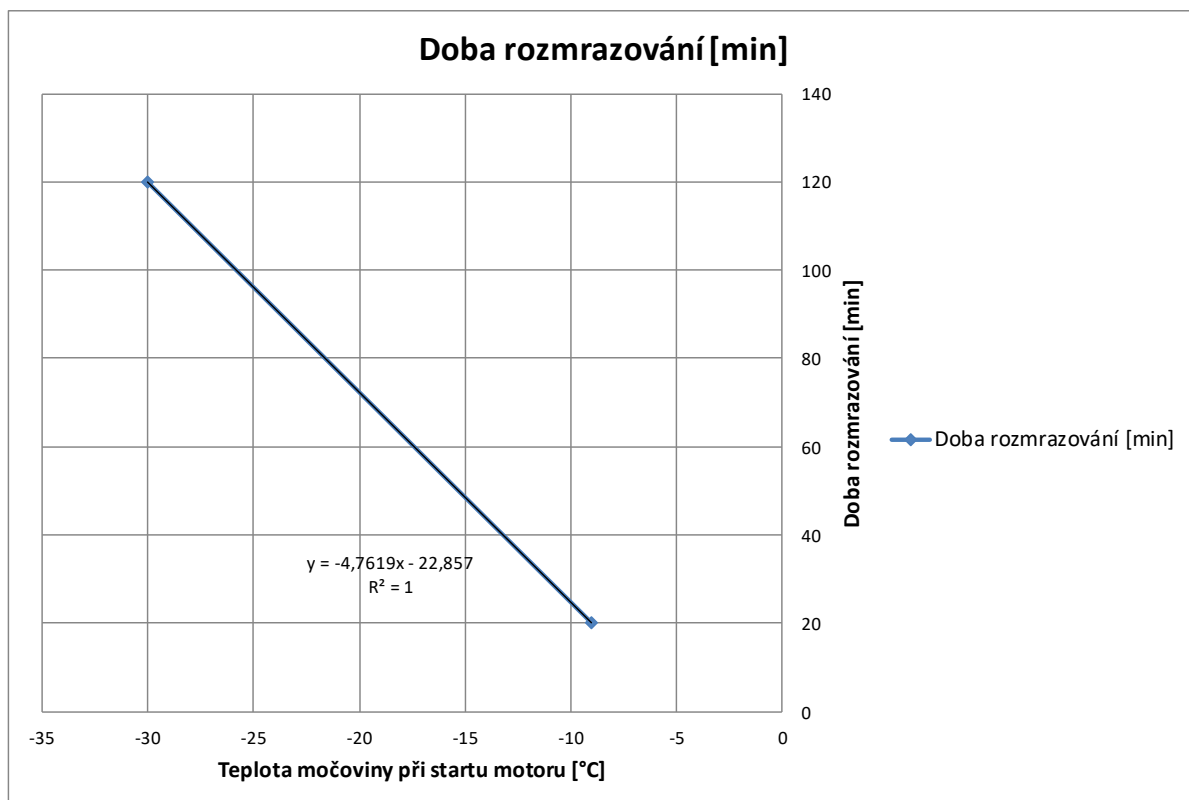
Tab. 10 Strategie vyhřívání močoviny

Proměnná	Teplota močoviny ($^{\circ}\text{C}$)
Teplota vypnutí vyhřívání	3
Teplota zapnutí vyhřívání	-3
Teplota zapnutí čerpadla močoviny	-7
Teplota vypnutí čerpadla močoviny	-11

Čas rozmrazování je počítán jako lineární interpolace mezi dvěma body. Dva body jsou definovány v kalibraci podle následující tabulky:

Tab. 11 Nastavení doby pro rozmrazování močoviny v závislosti na teplotě močoviny

Teplota močoviny při startu motoru [$^{\circ}\text{C}$]	Doba rozmrazování [min]
-9	20
-30	120



Obr. 38 Graf doby rozmrazování v závislosti na teplotě močoviny [15]



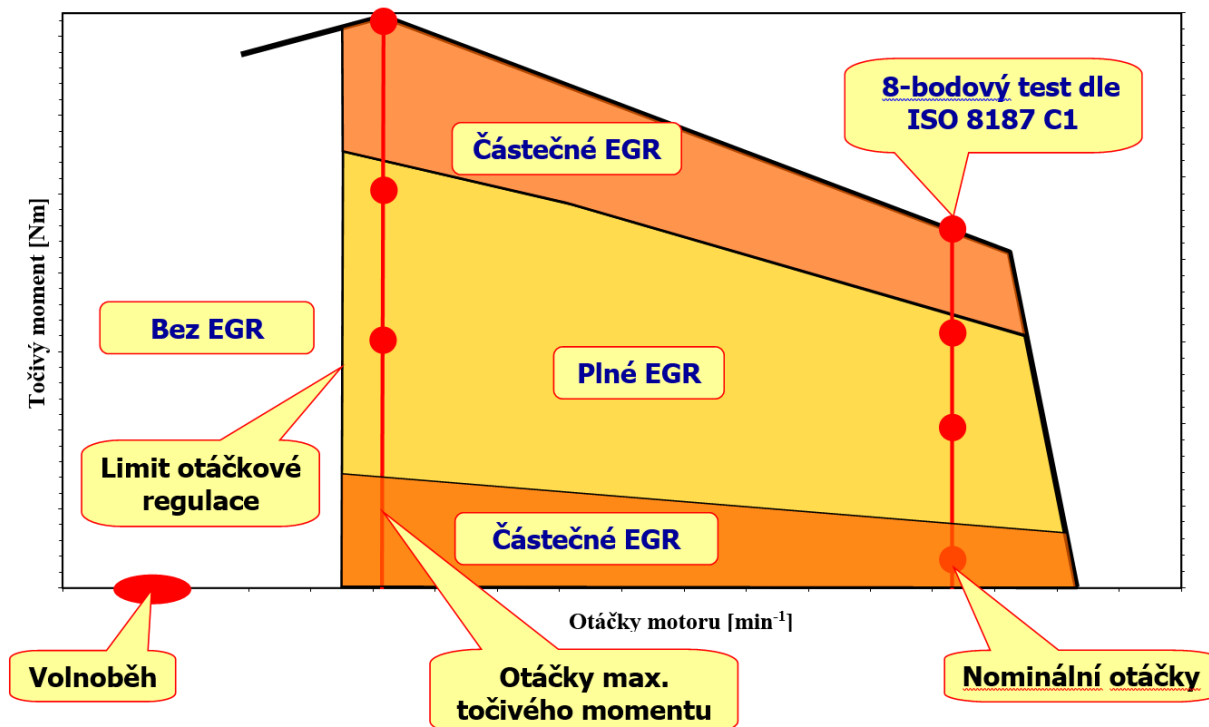
7 ZÁKLADNÍ MAPOVÁNÍ SUROVÝCH EMISÍ MOTORU

7.1 HODNOTY PLYNNÝCH EMISÍ MOTORU

Pro základní zmapování plyných emisí motoru byl Z1605 změřen na brzdovém stanovišti a byly měřeny plyné emise v zatěžovacích charakteristikách při otáčkách 2300, 2200, 1800, 1480, 1240, 1000 [1/min]. Plyné emise byly změřeny ve dvou konfiguracích, a to v provedení plnicím emisní předpis STAGE 3B, to znamená s EGR systémem, a dále pak bez použití EGR. Použití systému EGR je doporučováno výrobcí motorů z USA pro splnění emisních norem platných pro USA [16] [17] [19].

7.2 STRATEGIE EGR NA MĚŘENÉM MOTORU

Jak bylo napsáno, motor byl měřen se strategií EGR tak, jak byl homologován pro emisní předpis STAGE 3B. Tato strategie byla zvolena tak, aby akceptovala 8-bodový měřicí cyklus. První bod jmenovité otáčky a maximální výkon je EGR ventil otevřen naplno, v druhém bodě jmenovité otáčky a 75% zatížení je ventil EGR otevřen na 1/3 zdvihu. Stejné nastavení je i v bodě 3, což jsou jmenovité otáčky a 50% zatížení, a v bodě číslo čtyři, což jsou jmenovité otáčky a 10% zatížení, je opět EGR ventil otevřen naplno. V bodě 5 otáčky maximálního točivého momentu na vnější charakteristice je EGR ventil otevřen naplno. V bodě číslo 6 otáčky maximálního točivého momentu a 75% zatížení je EGR otevřen na 1/3 zdvihu stejně jak v bodě 7 otáčky maximálního točivého momentu a 50% zatížení. Bod číslo 8, což je volnoběh, je EGR ventil uzavřen. Obr. 39 zobrazuje strategii EGR z homologačního protokolu motoru Z1606.

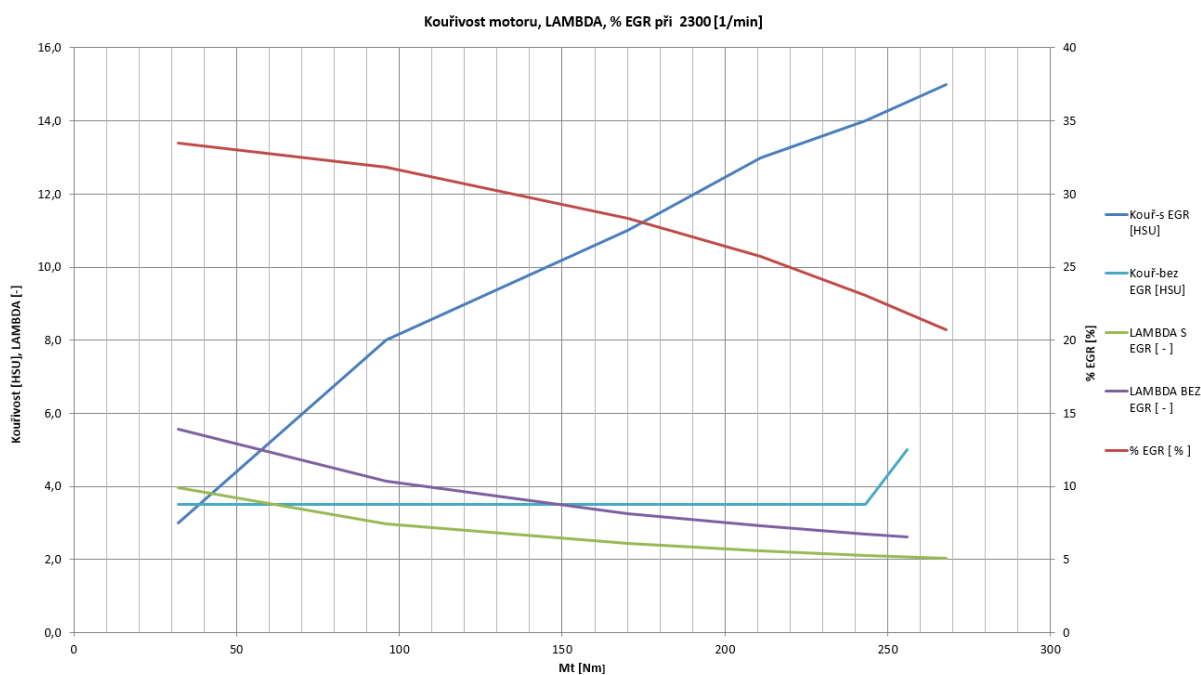


Obr. 39 Základní strategie otevítrání EGR ventilu vzhledem k NRSC testu



7.3 PLYNNÉ EMISE V ZATĚŽOVACÍ CHARAKTERISTICE PŘI 2300 [1/MIN]

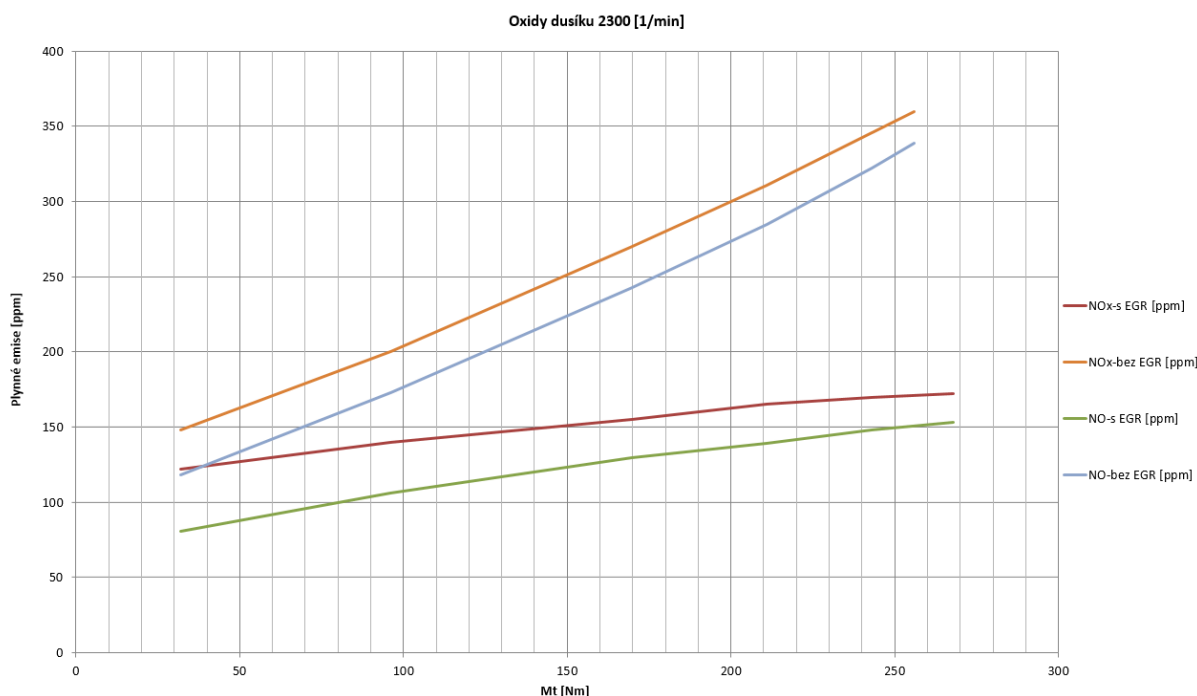
Měření byla prováděna na motorové brzdě s motorem, kterému byl ventil EGR ovládán ručně. Režimy měření vycházela s předepsaných zatížení a otáček motoru dle 8-bodového stacionárního cyklu. Jako jeden z významných sledovaných parametrů byla kouřivost. Pro sledování vlivů EGR byly zvoleny zatěžovací charakteristiky motoru. V Obr. 40 je vidět výrazný nárůst kouřivosti při použití EGR. Jak je patrné, se zvyšujícím se zatížením kouřivost výrazně roste. Zvýšená kouřivost má výrazně negativní dopad na DPF filtr a jeho zanášení, což bude mít zvýšený nárok na regenerace. Zvýšená kouřivost je vysvětlitelná díky součiniteli přebytku vzduchu LAMBDA. Z naměřeného je vidět, že LAMBDA s EGR je o cca 30% nižší. Jako zajímavé vyhodnocení EGR je možnost kvantifikovat EGR pomocí rozdílu změřeného množství nasávaného vzduchu na motoru s EGR a bez EGR. Toto procentuální kvantifikování EGR je vidět v Obr. 40 jako %EGR. Z Obr. 40 je vidět, že množství EGR klesá se zvyšujícím se zatížením.



Obr. 40 Kouřivost motoru, LAMBDA a %EGR při 2300 [1/min] v zatěžovací charakteristice

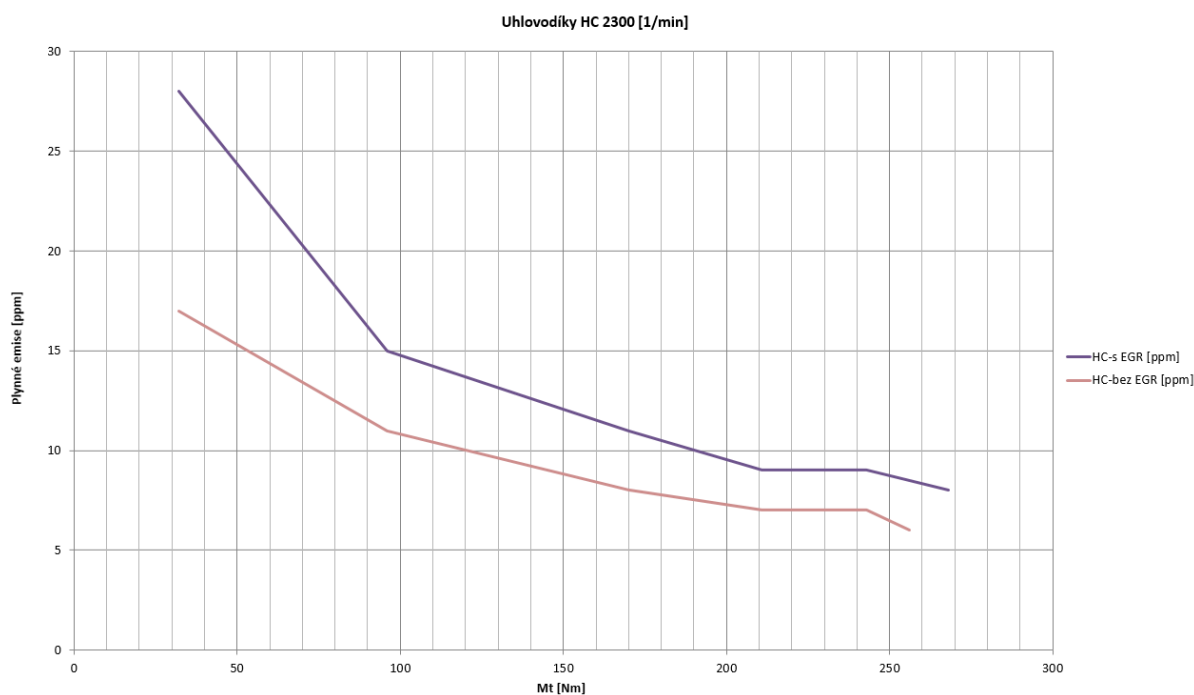


Jako další sledovaný parametr byl sledován vliv EGR na emise NO_x a NO Obr. 41. Pro dobrou regeneraci DPF filtru se považuje ideální poměr NO_x k NO cca 50% [7]. Z naměřeného je vidět, že použití EGR tento poměr mění. Jak je patrné pro dobrou regeneraci DPF filtru je užití EGR velmi nevýhodné a to ani ne z pohledu poměru NO_x/NO , ale hlavně z důvodu podstatně vyšší kouřivosti Obr.40 . Z Obr. 41 je patrné, že při zatížení 50 Nm je poměr NO_x/NO při požití EGR cca 60% a při zatížení 250 Nm 88 %. Jestliže, je ale EGR systém vypnut pak pro 50 Nm je poměr 83% a při zatížení 250 Nm 90%. Změna poměru NO_x/NO je se mění při použití EGR velmi málo.

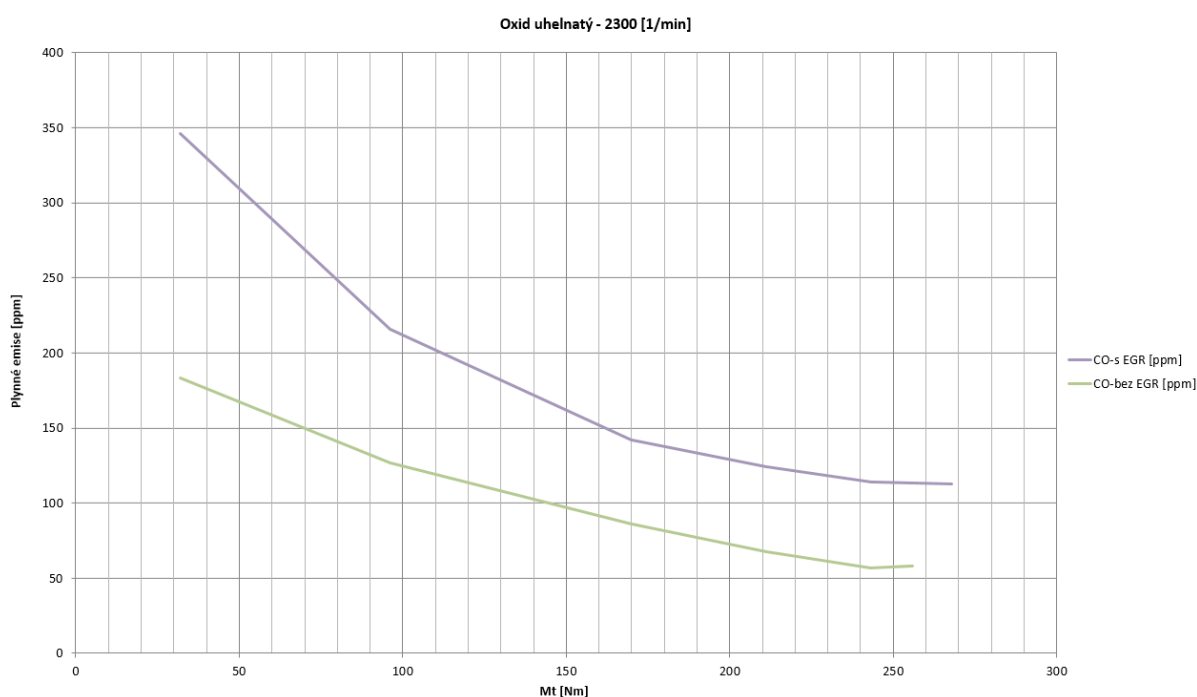


Obr. 41 NO_x , NO při 2300 [1/min] v zatěžovací charakteristice motor s EGR a bez EGR

Vliv EGR na emise uhlovodíků a CO je vidět v Obr č. 42 a 43. Je patrné, že EGR má zhoršující vliv na uhlovodíky HC , kdežto na CO má pozitivní vliv. Jelikož obě dvě složky jsou hluboko pod limitem daným legislativou, je negativní vliv na HC možné ignorovat.



Obr. 42 HC při 2300 [1/min] v zatěžovací charakteristice motor s EGR a bez EGR

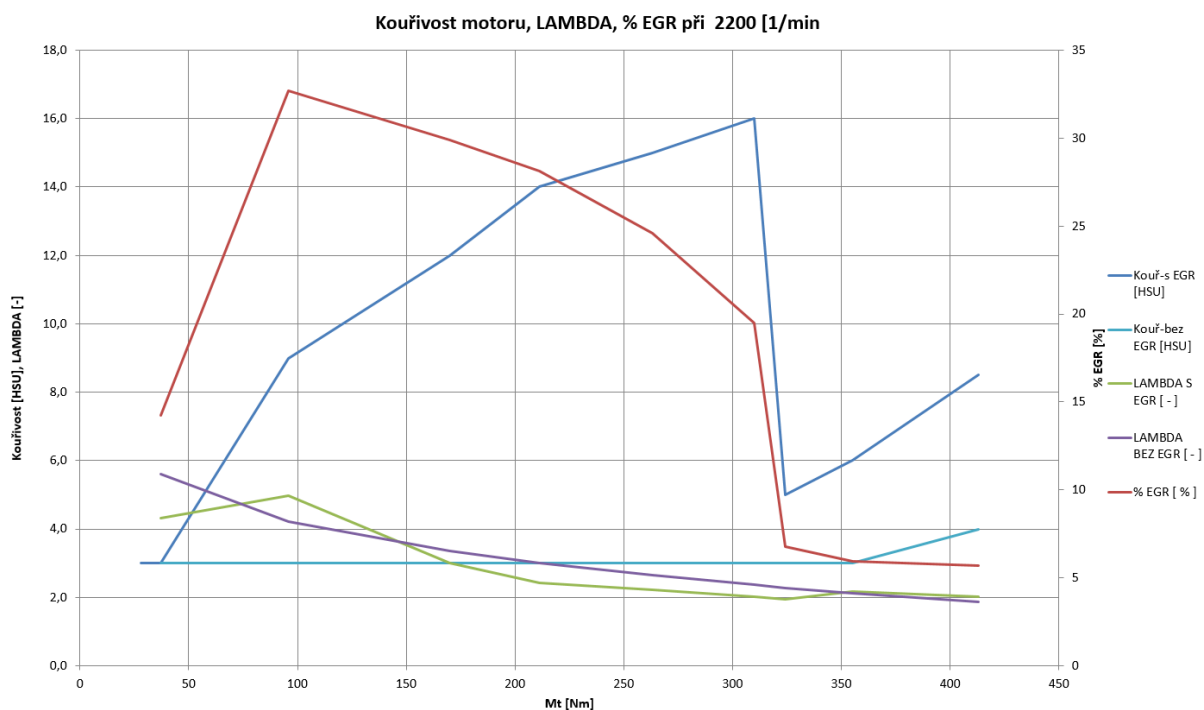


Obr. 43 CO při 2300 [1/min] v zatěžovací charakteristice motor s EGR a bez EGR

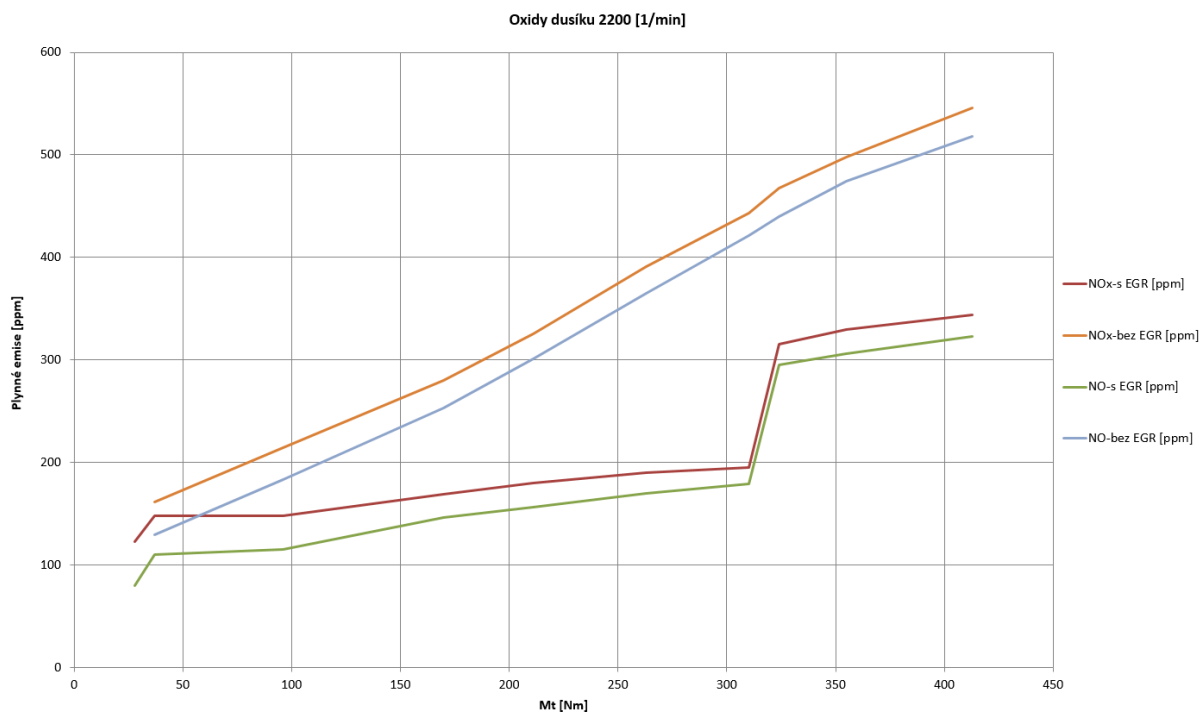


7.4 PLYNNÉ EMISE V ZATĚŽOVACÍ CHARAKTERISTICE PŘI 2200 [1/MIN] (MAXIMÁLNÍ VÝKON MOTORU)

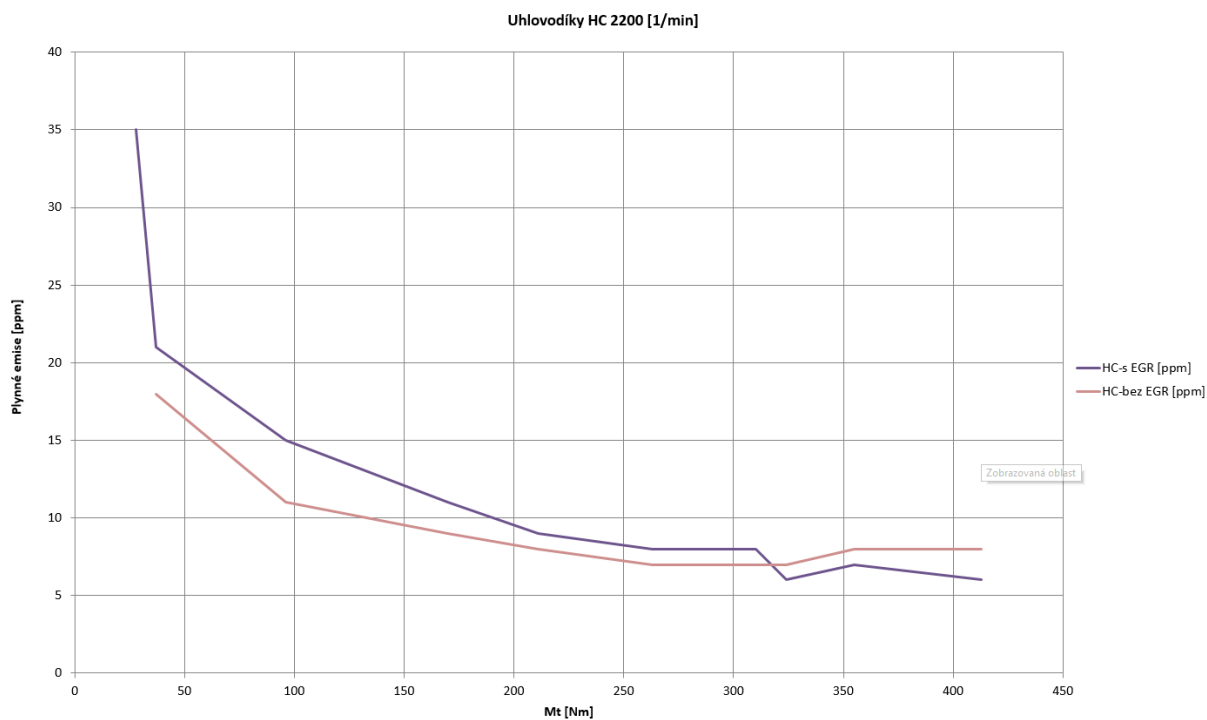
Popsané vlivy EGR v kapitole 7.3 byly potvrzeny i při otáčkách 2200 1/min. V Obr. 44 jsou vidět ostré zlomy v průběhu kouřů i na průběhu součinitele přebytku vzduchu - LAMBDA. Tyto ostré zlomy jsou dány použitou strategií EGR. Stejně je tomu i u emisí NO_x, NO, HC a CO Obr. 45, 46, 47.



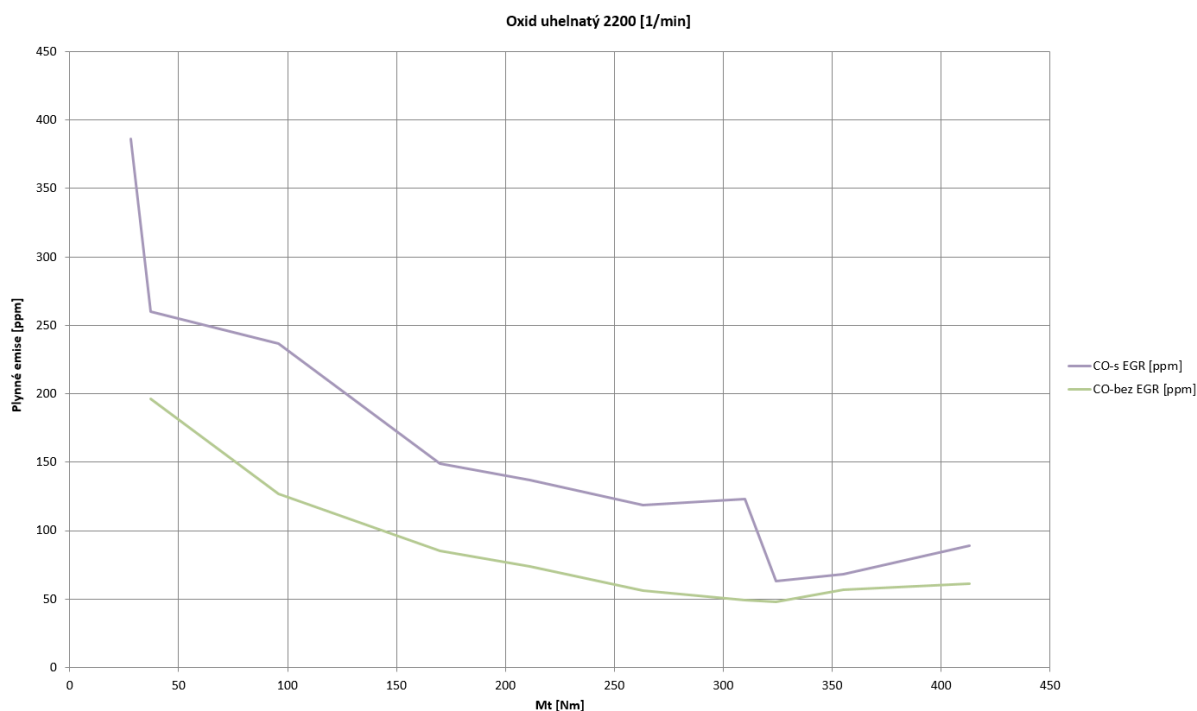
Obr. 44 Kouřivost motoru, LAMBDA a %EGR při 2200 [1/min] v zatěžovací charakteristice



Obr. 45 NO_x, NO při 2200 [1/min] v zatěžovací charakteristice motor s EGR a bez EGR



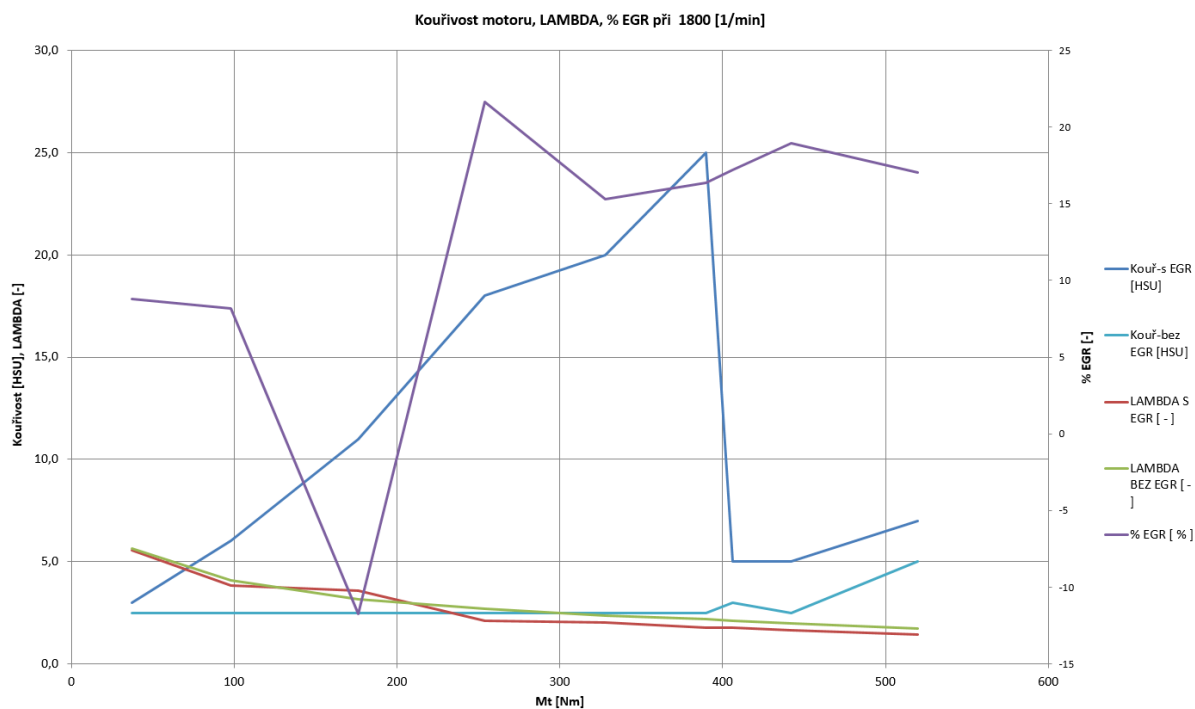
Obr. 46 NO_x, NO při 2200 [1/min] v zatěžovací charakteristice motor s EGR a bez EGR



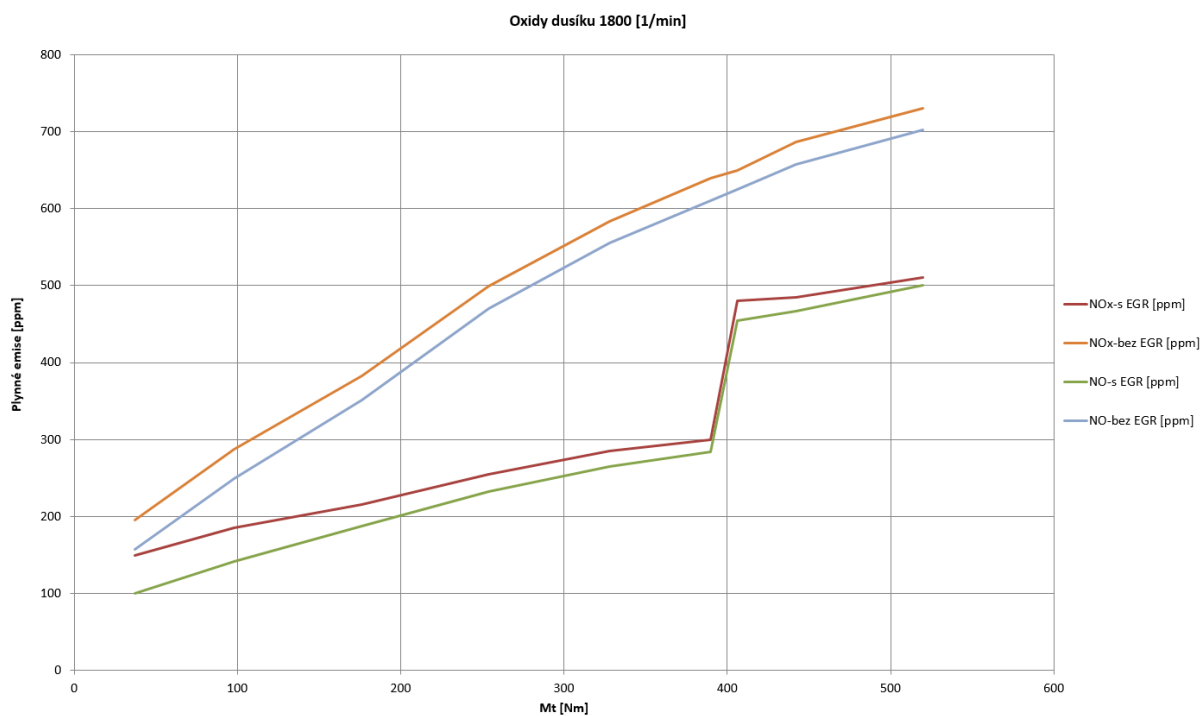
Obr. 47 CO při 2200 [1/min] v zatěžovací charakteristice motor s EGR a bez EGR

7.5 PLYNNÉ EMISE V ZATĚŽOVACÍ CHARAKTERISTICE PŘI 1800 [1/MIN]

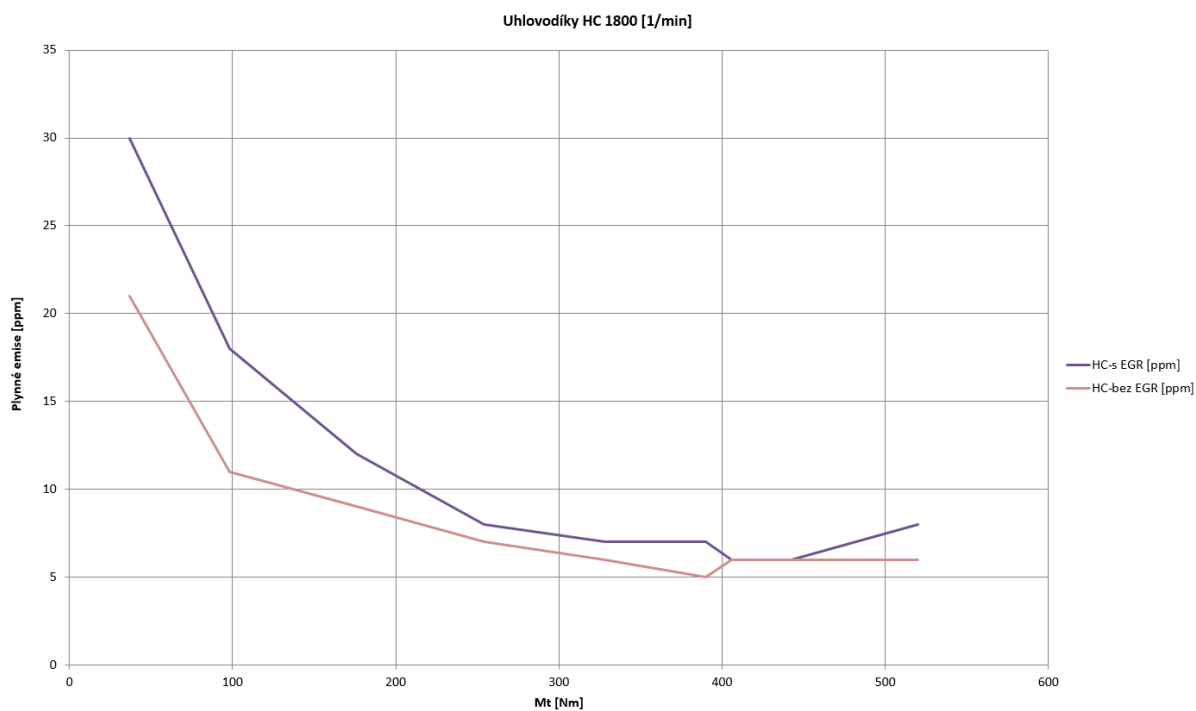
Tak jak při otáčkách 2200 [1/min] jsou vidět na Obr. 48 ostré zlomy v průběhu kouřů i na průběhu součinitele přebytku vzduchu - LAMBDA. Důvod těchto ostrých zlomů je stejný jak v předchozí kapitole a je to strategie otevírání EGR ventilu. Poměry NO_x/NO jsou obdobné jak při otáčkách 2300 1/min. I při těchto otáčkách je vidět výrazný vliv EGR na kouřivost motoru. Toto bude ještě patrnější při otáčkách maximálního točivého momentu 1480 1/min.



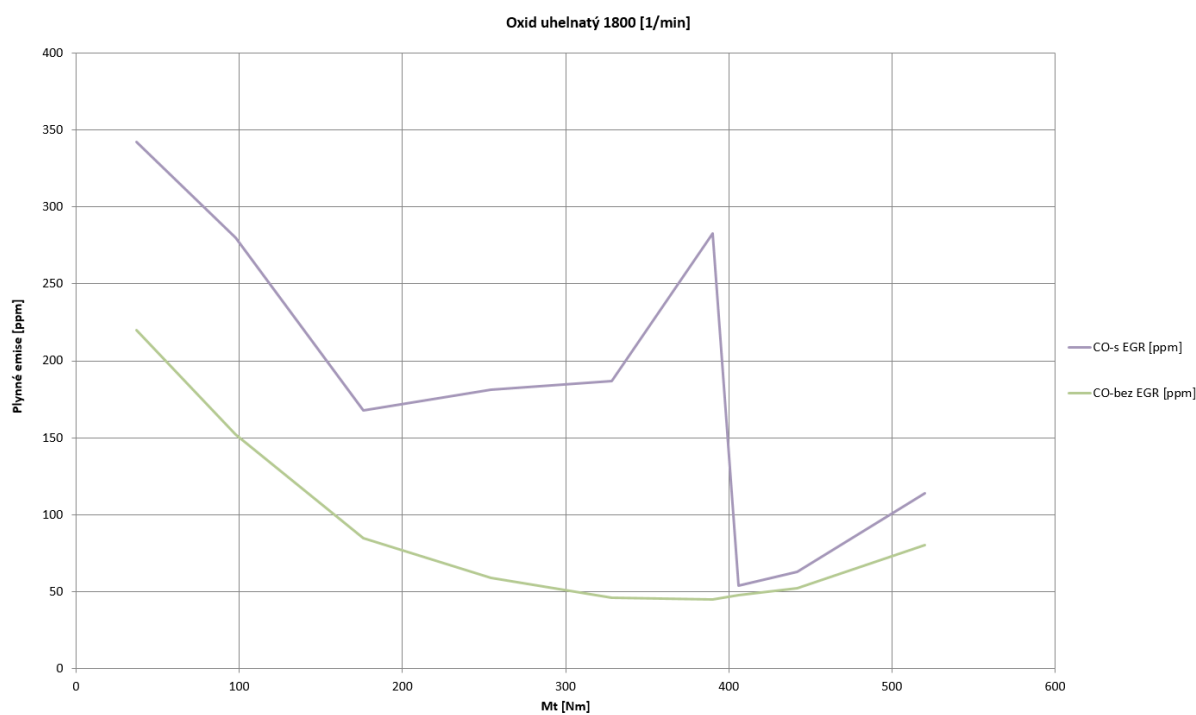
Obr. 48 Kouřivost motoru, LAMBDA a %EGR při 1800 [1/min] v zatěžovací charakteristice



Obr. 49 NOx, NO při 1800 [1/min] v zatěžovací charakteristice motor s EGR a bez EGR



Obr. 50 HC při 1800 [1/min] v zatěžovací charakteristice motor s EGR a bez EGR

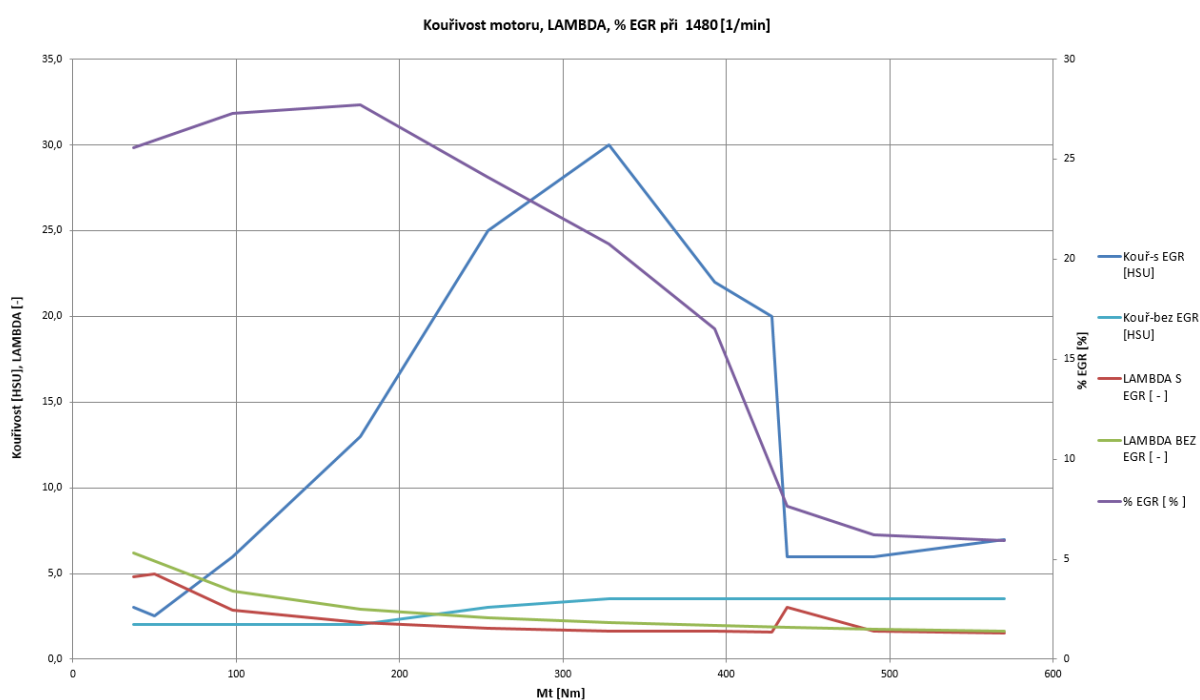


Obr. 51 CO při 1800 [1/min] v zatěžovací charakteristice motor s EGR a bez EGR

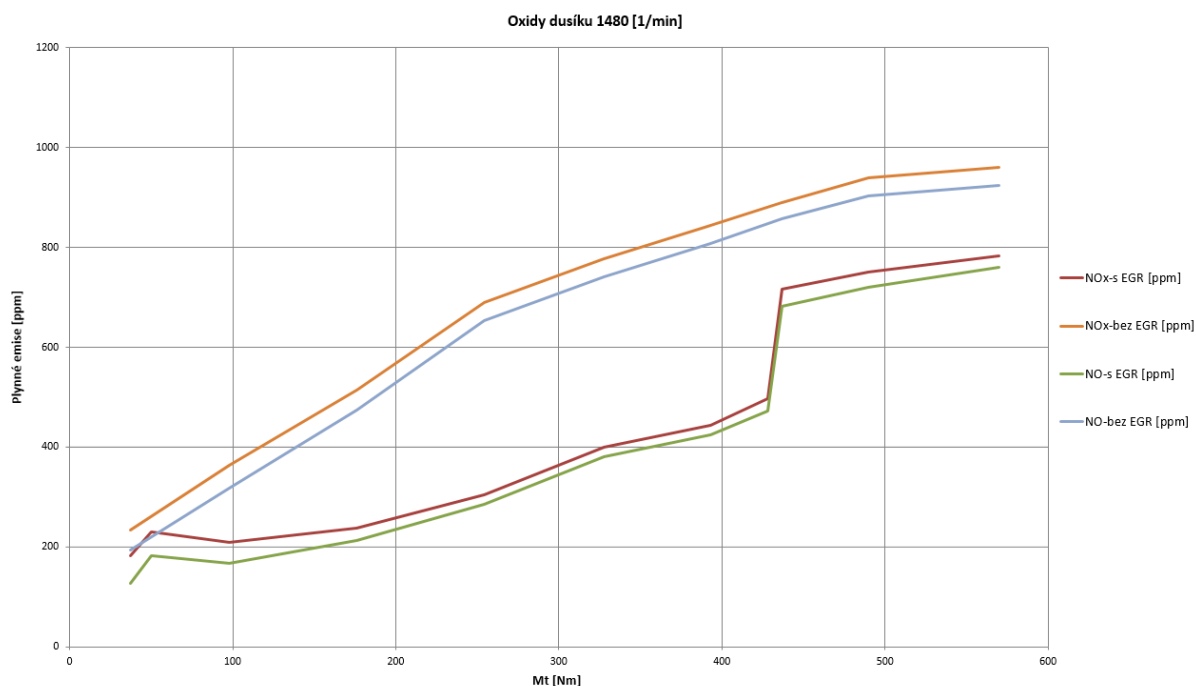


7.6 PLYNNÉ EMISE V ZATĚŽOVACÍ CHARAKTERISTICE PŘI 1480 [1/MIN] (MAXIMÁLNÍ TOČIVÝ MOMENT)

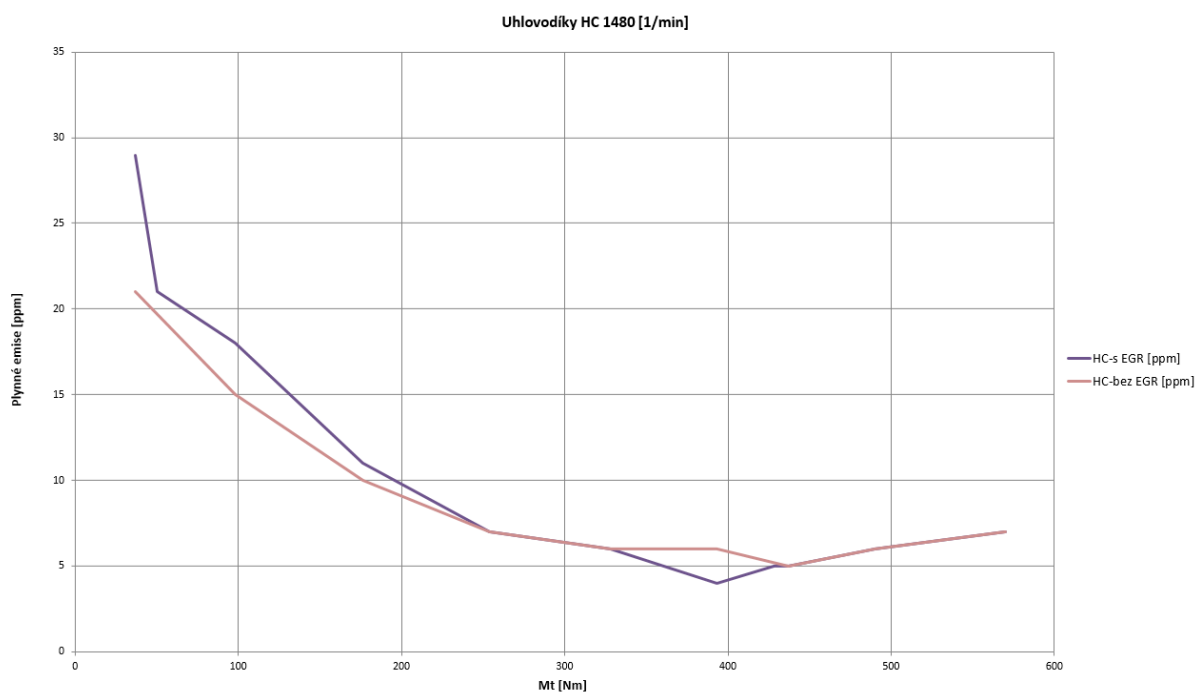
V Obr. 52, 53 je patrné, že průběh kouře, LAMBDA, NO_x, koresponduje se strategií otevírání EGR ventilu. Na průběhu je zcela zjevné otevření EGR ventilu cca při 450 Nm z pozice částečně otevřeného EGE ventilu na plně otevřený EGR ventil. LAMBDA klesá s prudkým zvýšením kouřivosti naopak NO_x klesnou z 650 ppm na 500 ppm. Při této změně otevření EGR se zvyšuje i CO. Vliv na HC není patrný.



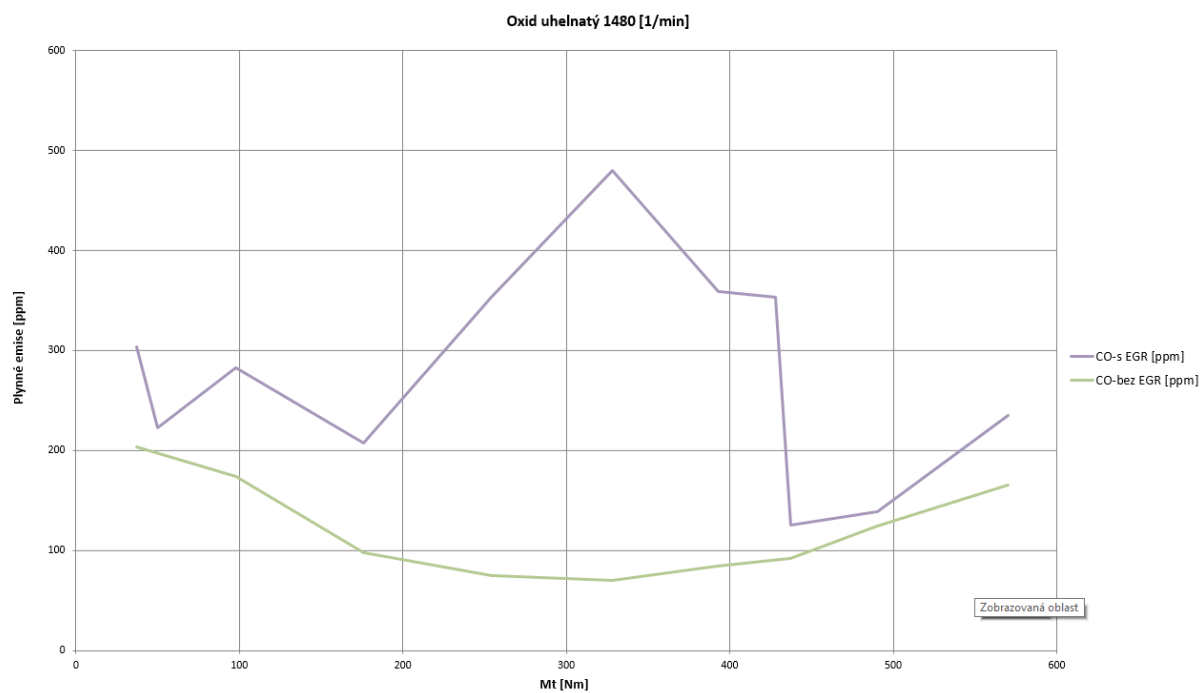
Obr. 52 Kouřivost motoru, LAMBDA a %EGR při 1480 [1/min] v zatěžovací charakteristice



Obr. 53 NO_x, NO při 1480 [1/min] v zatěžovací charakteristice motor s EGR a bez EGR



Obr. 54 HC při 1480 [1/min] v zatěžovací charakteristice motor s EGR a bez EGR

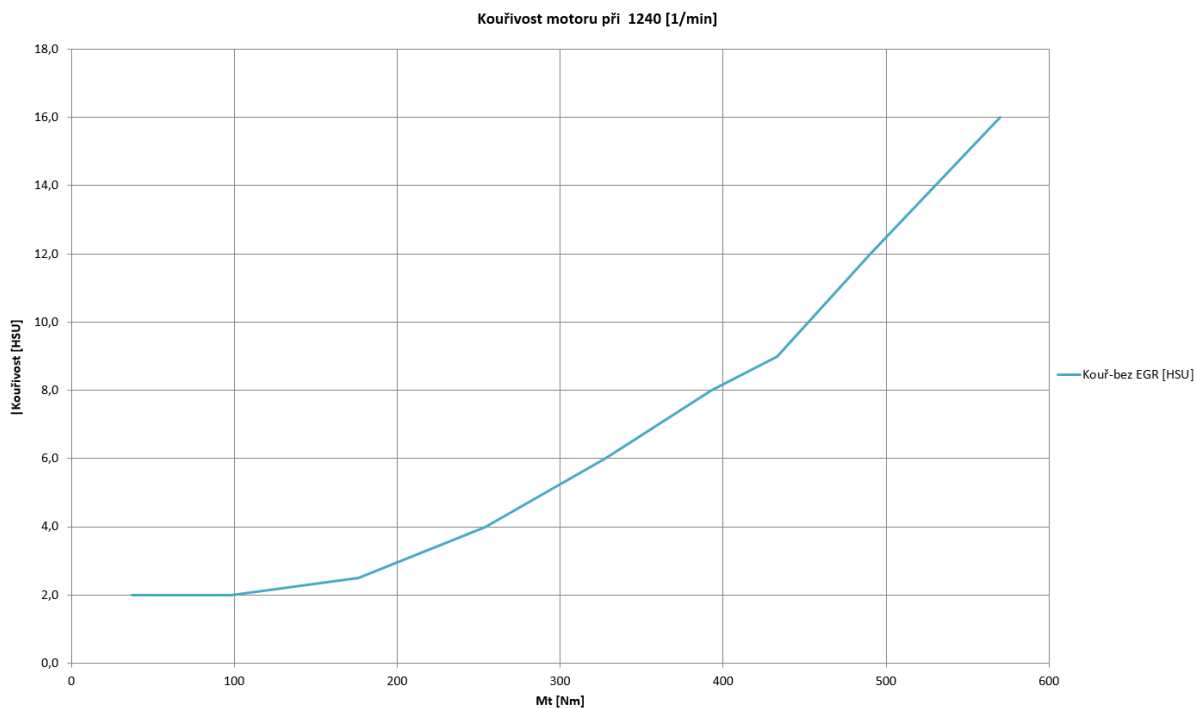


Obr. 55 CO při 1480 [1/min] v zatěžovací charakteristice motor s EGR a bez EGR

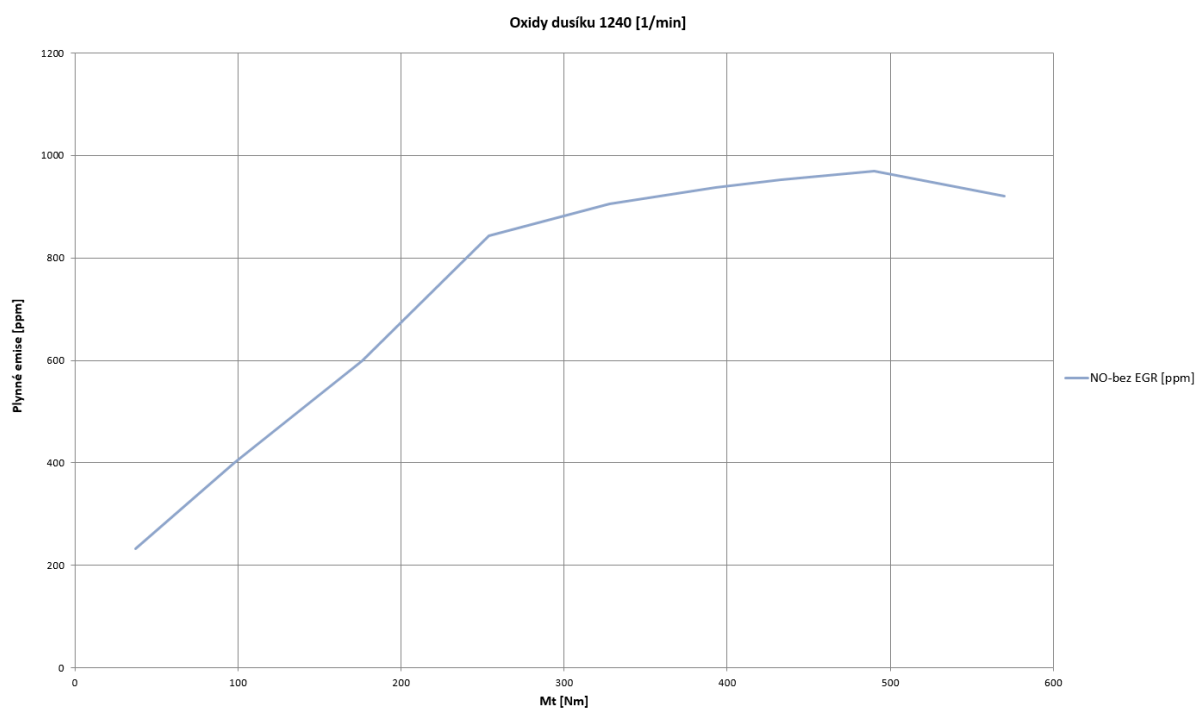


7.7 PLYNNÉ EMISE V ZATĚŽOVACÍ CHARAKTERISTICE PŘI 1240 [1/MIN]

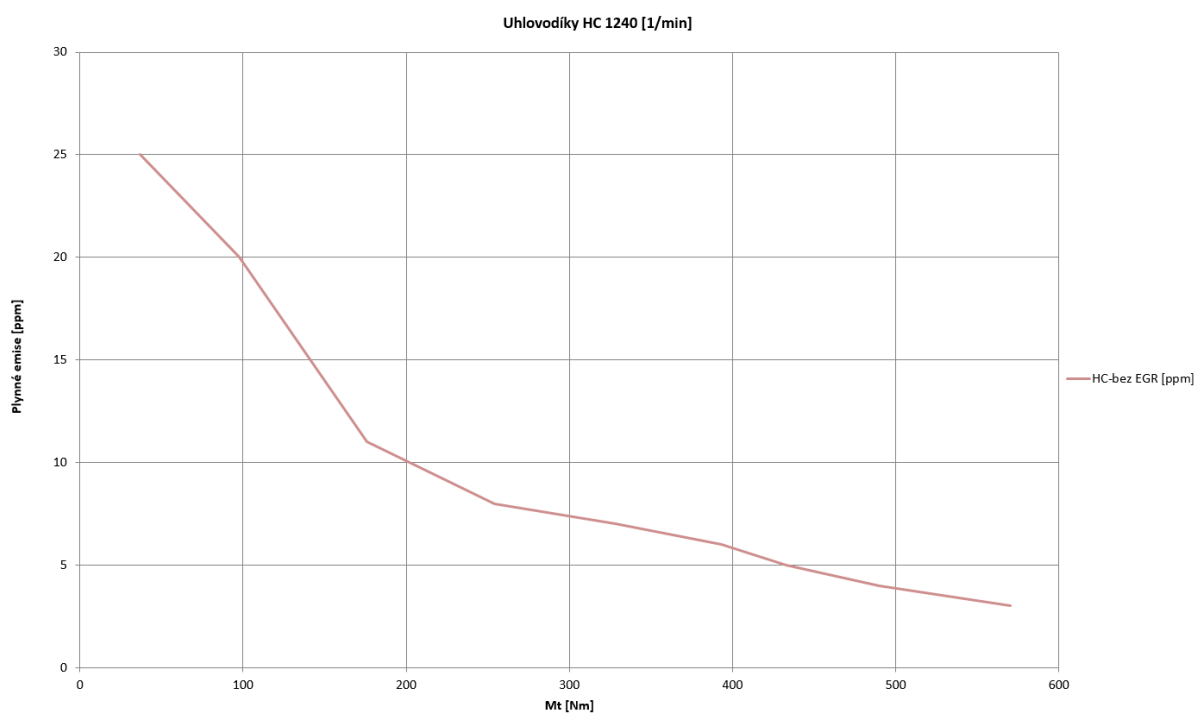
Při otáčkách 1240 1/min je EGR ventil dle strategie popsané v kapitole 8.2 uzavřen. Tudiž v příslušných grafech jednotlivých emisí jsou výsledky jen bez EGR. Grafy z Obr. 56 až 59 zobrazují průběh jednotlivých emisí v zatěžovací charakteristice.



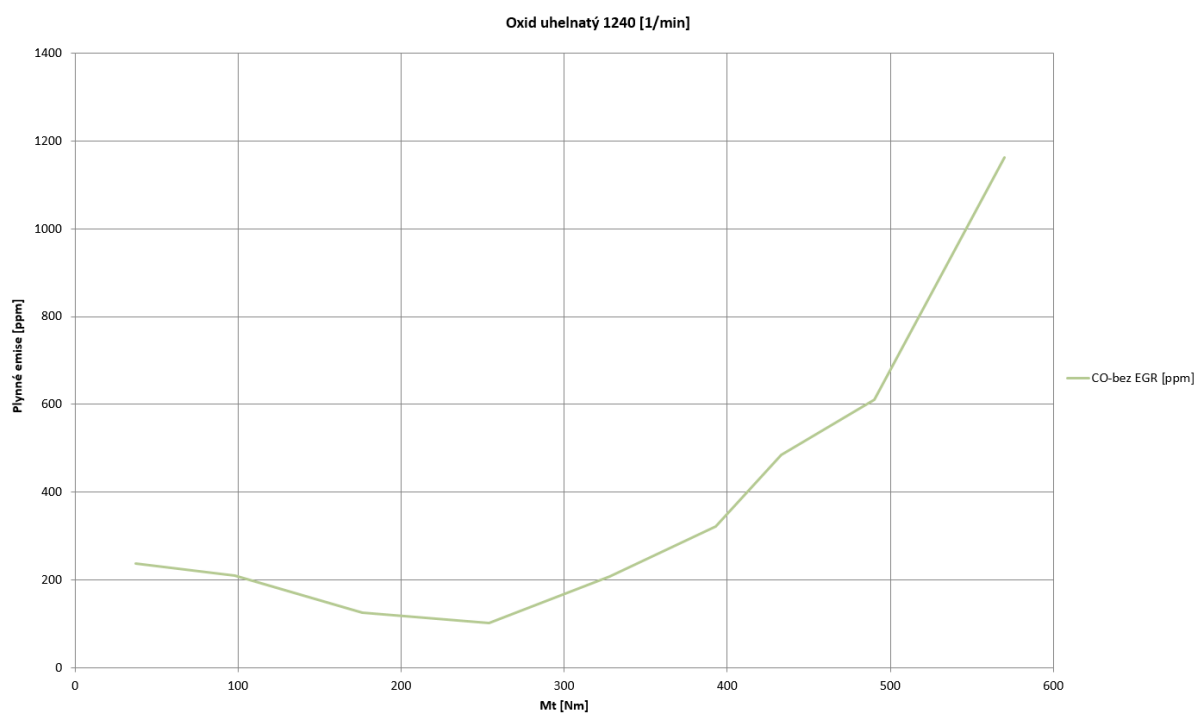
Obr. 56 Kouřivost motoru při 1240 [1/min] v zatěžovací charakteristice



Obr. 57 NOx, NO při 1240 [1/min] v zatěžovací charakteristice motor bez EGR



Obr. 58 HC při 1240 [1/min] v zatěžovací charakteristice motor bez EGR

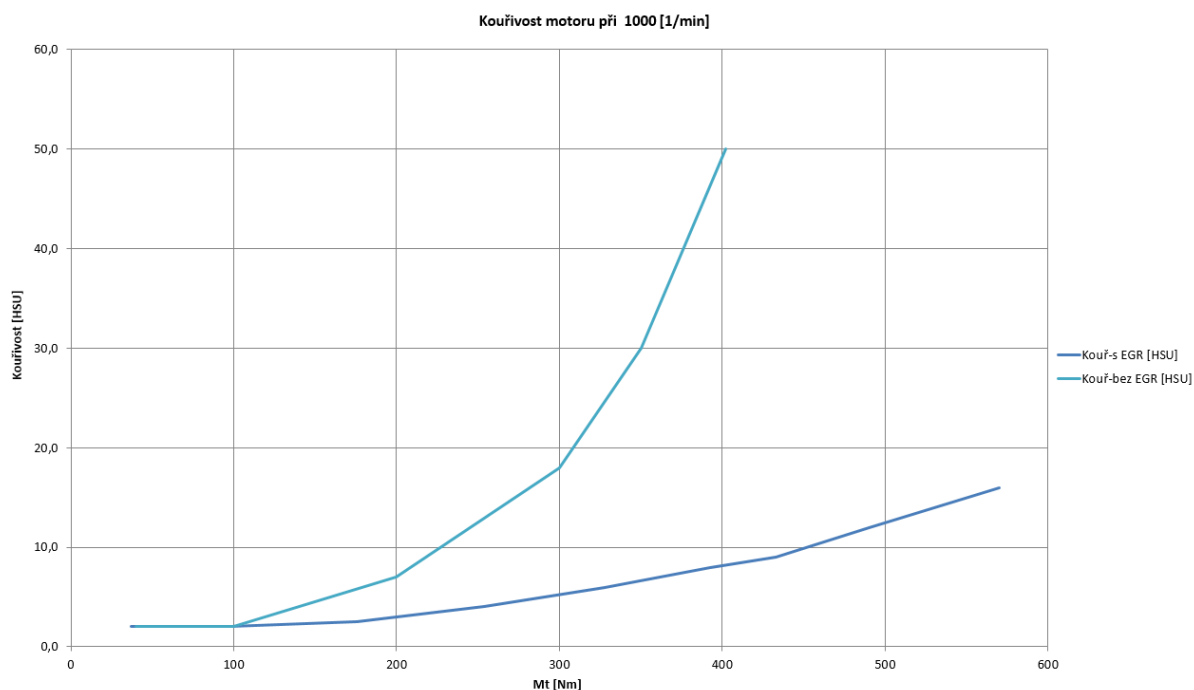


Obr. 59 CO při 1240 [1/min] v zatěžovací charakteristice motor bez EGR

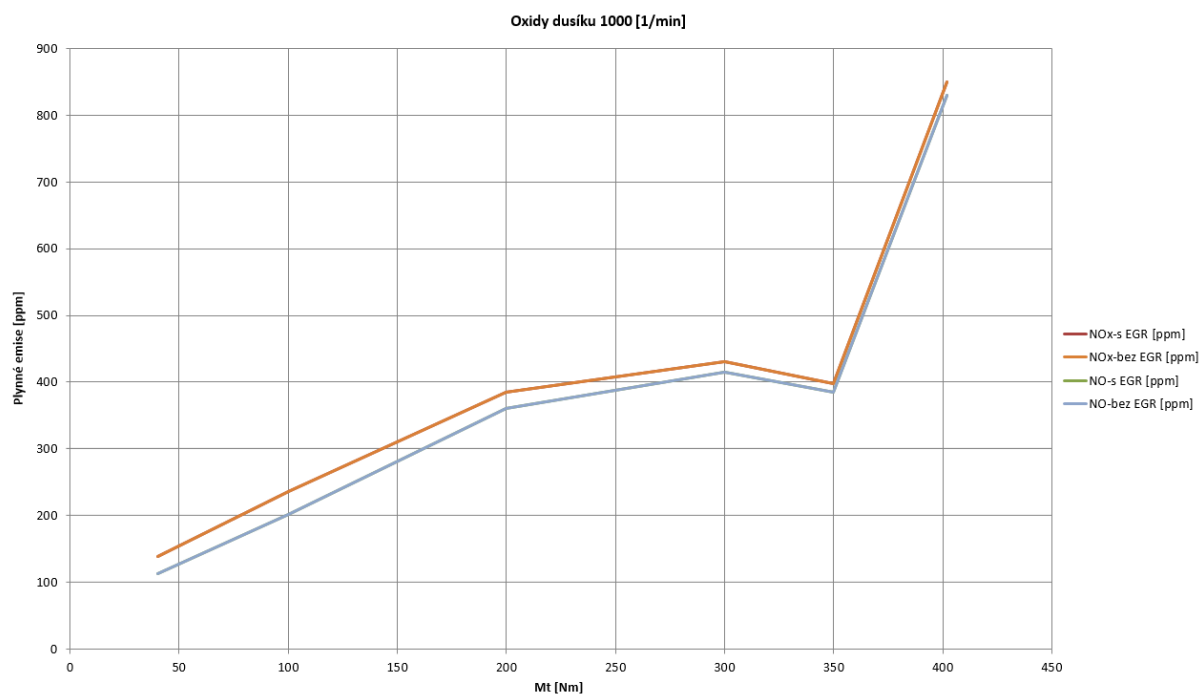


7.8 PLYNNÉ EMISE V ZATĚŽOVACÍ CHARAKTERISTICE PŘI 1000 [1/MIN]

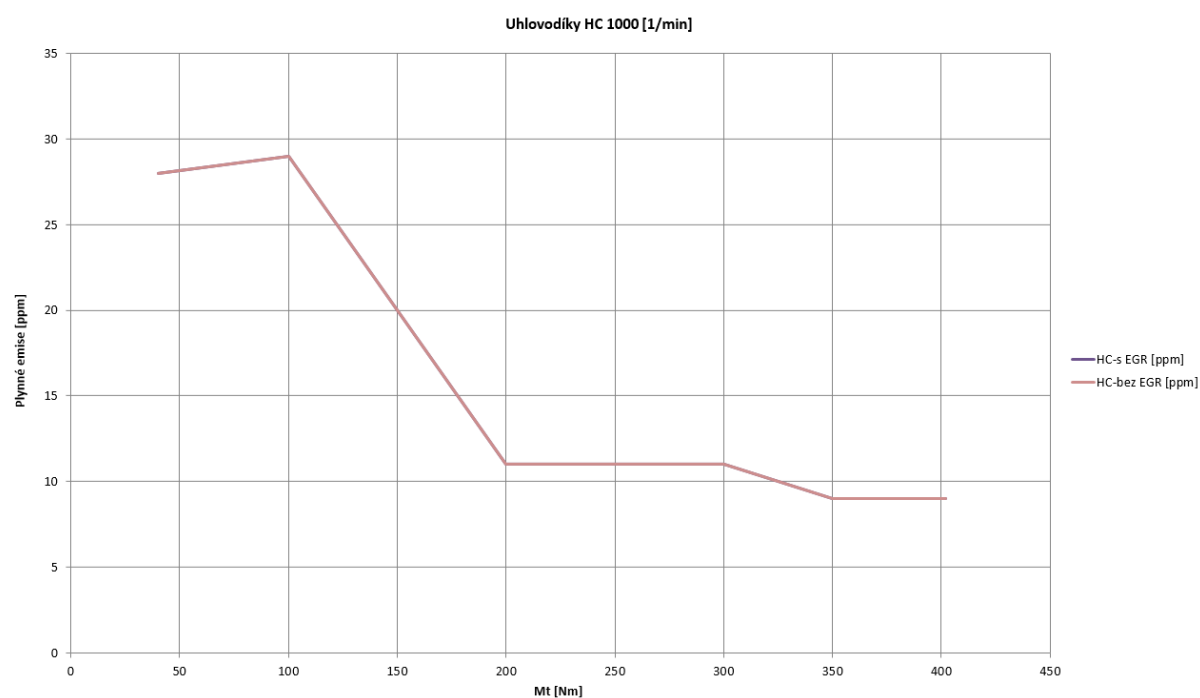
Ačkoliv by měl být dle použité strategie EGR ventil uzavřen bylo provedeno měření i s částečně otevřeným EGR ventilem. Množství recirkulovaných výfukových plynů bylo velmi nízké z důvodů nízkého tlakového spádu (poměr tlaku vzduchu za kompresorem turbodmychadla a tlakem výfukových plynů před turbínou turbodmychadla). Jak je vidět v těchto otáčkách má recirkulace velmi vysoký vliv na kouřivost. Přitom vliv na snížení NO_x je velmi nízký respektive žádný. Jak je na Obr. 62, 63 křivky se naprosto ztotožňují a vliv na HC a CO není žádný.



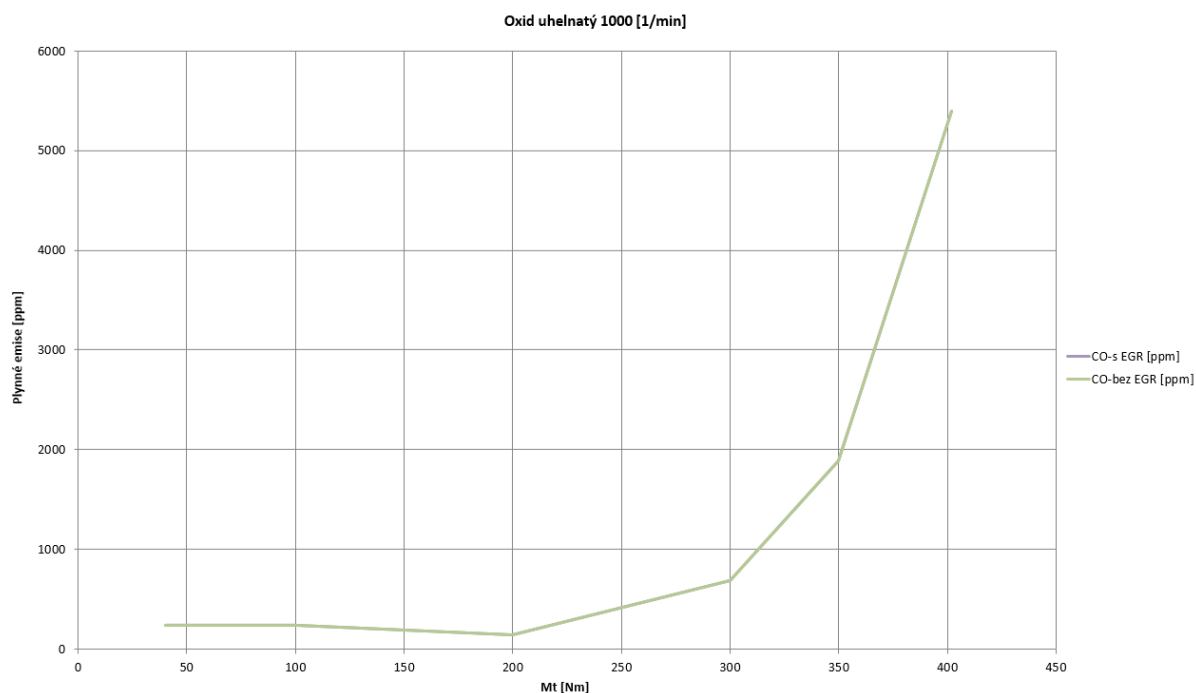
Obr. 60 Kouřivost motoru při 1000 [1/min] v zatěžovací charakteristice



Obr. 61 NOx, NO při 1000 [1/min] v zatěžovací charakteristice motor bez EGR



Obr. 62 HC při 1240 [1/min] v zatěžovací charakteristice motor bez EGR



Obr. 63 CO při 1000 [l/min] v zatěžovací charakteristice motor bez EGR

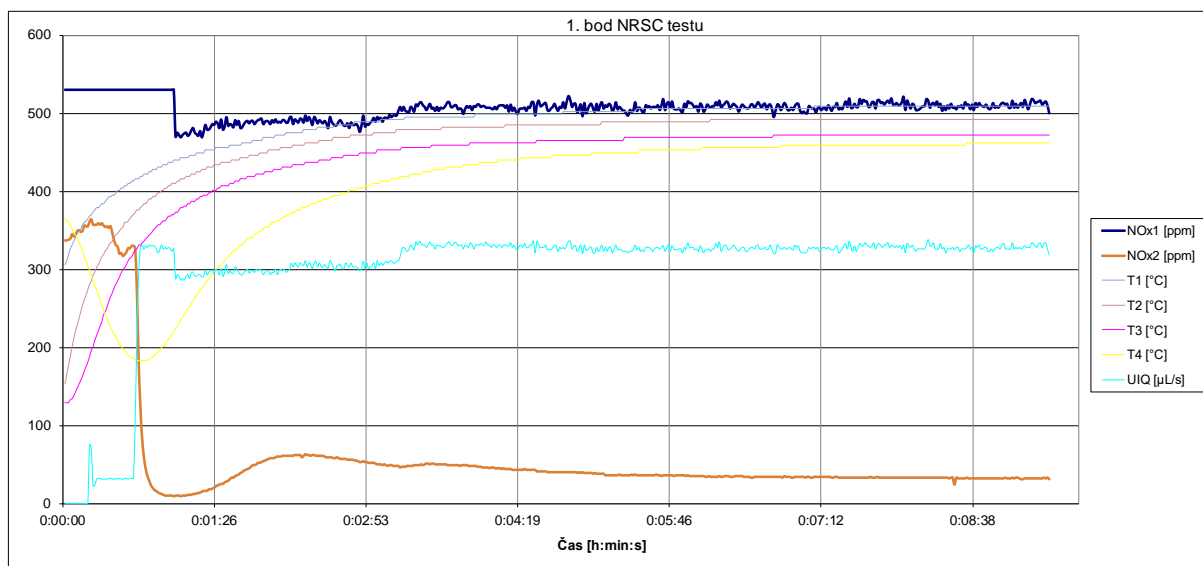
Z provedených měření surových emisí je možné konstatovat, že přínos EGR systému na emise NO_x je značný, ale zároveň je také patrné podstatné zvýšení kouřivosti motoru. Z hlediska optimalizačních činností na motoru s navrženým aftersystemem bude důležité najít kompromis mezi množstvím recirkulovaných výfukových plynů a účinností zejména SCR katalyzátoru.



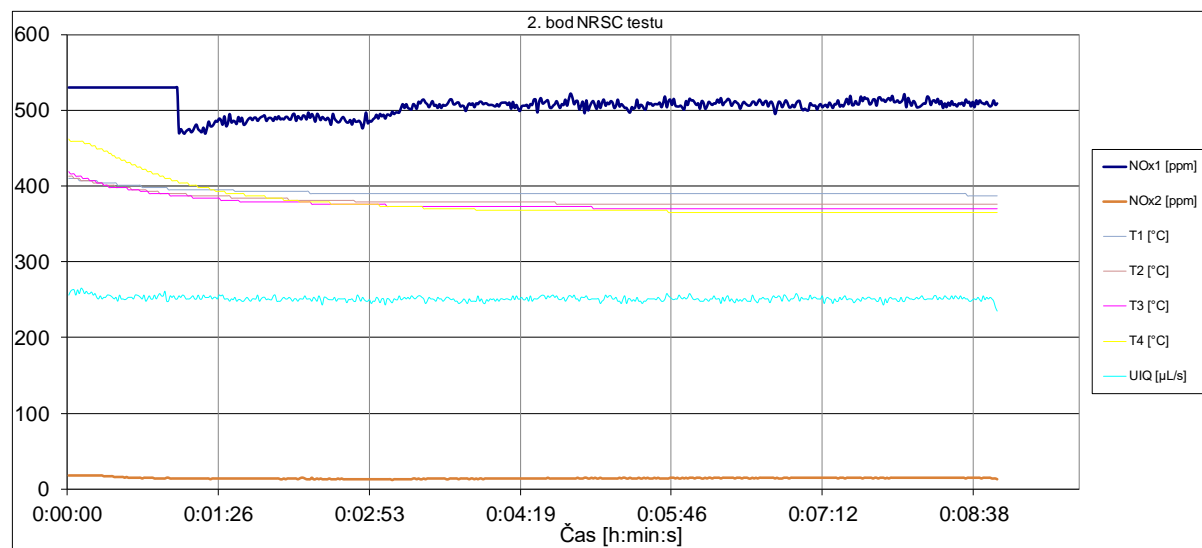
8 MĚŘENÍ EMISÍ MOTORU S AFTERTREATMENTEM

8.1 MĚŘENÍ V STATICKÉM 8-BODOVÉM EMISNÍM TESTU (NRSC)

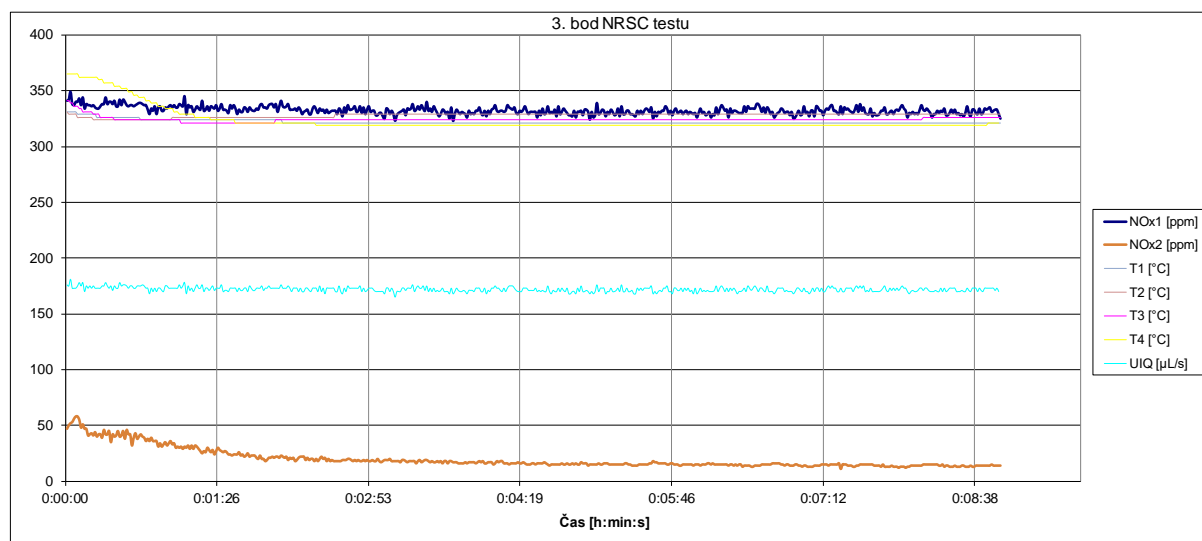
Z výsledků měření emisí surového motoru je patrné, že pro splnění emisního limitu STAGE 4 bude nutné snížit emise NO_x cca o 90% - 95%. Pro dosažení takové vysoké redukce je potřeba optimalizovat vstřikované množství močoviny pro každý bod. V prvním bodu 8-bodového statického testu bylo spočítáno teoretické množství močoviny. Pro otáčky 2200 [1/min] a zatížení 580 Nm je toto množství 272,4 $\mu\text{L/s}$. V Obr. 64 jsou znázorněny průběhy sledovaných emisí, a to jak surových NO_{x1}, tak i výsledných NO_{x2}. Teploty na SCR katalyzátoru se ukazují jako důležitý parametr mající podstatný vliv na účinnost redukce NO_x. Jak je vidět po zahřátí SCR a ustálení teplot klesly emise NO_x z cca 470 ppm na 30 ppm. Což ukazuje velmi dobrou konverzi cca 94%. Při optimalizaci každého bodu 8-bodového cyklu na motorové brzdě bylo využito možnosti změny jak otevření EGR ventilu tak množství vstřikovaného množství močoviny. Optimalizace NO_x je velmi zdoluhavá a vyžaduje spoustu hodin měření na brzdě, jelikož je nutná dlouhá stabilizace teplot výfukových plynů na jednotlivé části systému SCR. Z grafu níže je patrné, že stabilizace teplot trvala v jednotlivých bodech více jak 3 minuty.



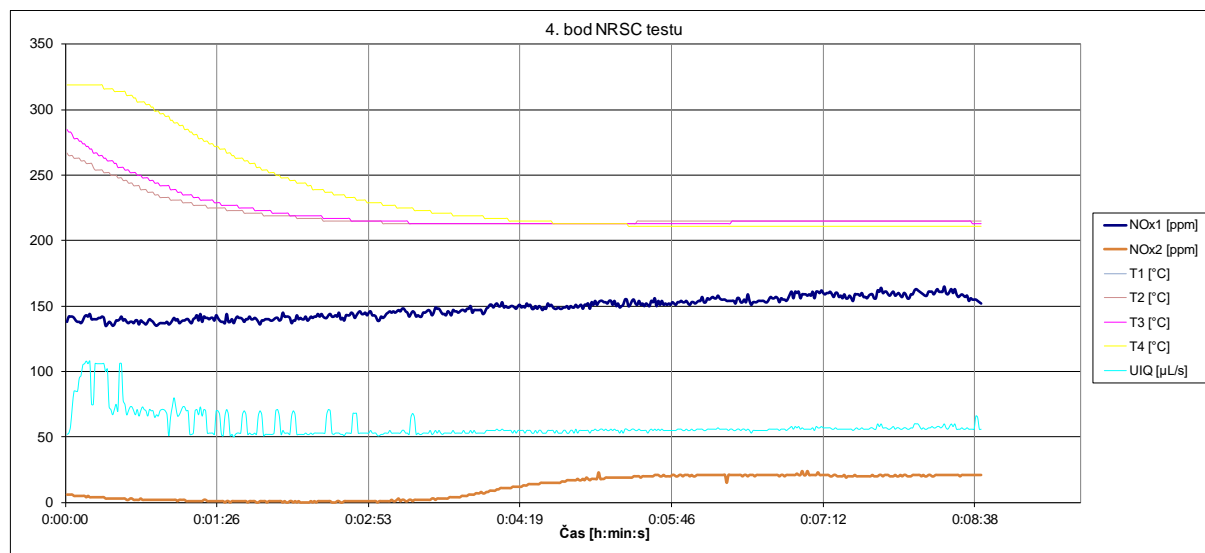
Obr. 64 NRSC 1-bod, hodnoty NO_{x1}, NO_{x2}, Teploty na EAT, vstřikované množství močoviny



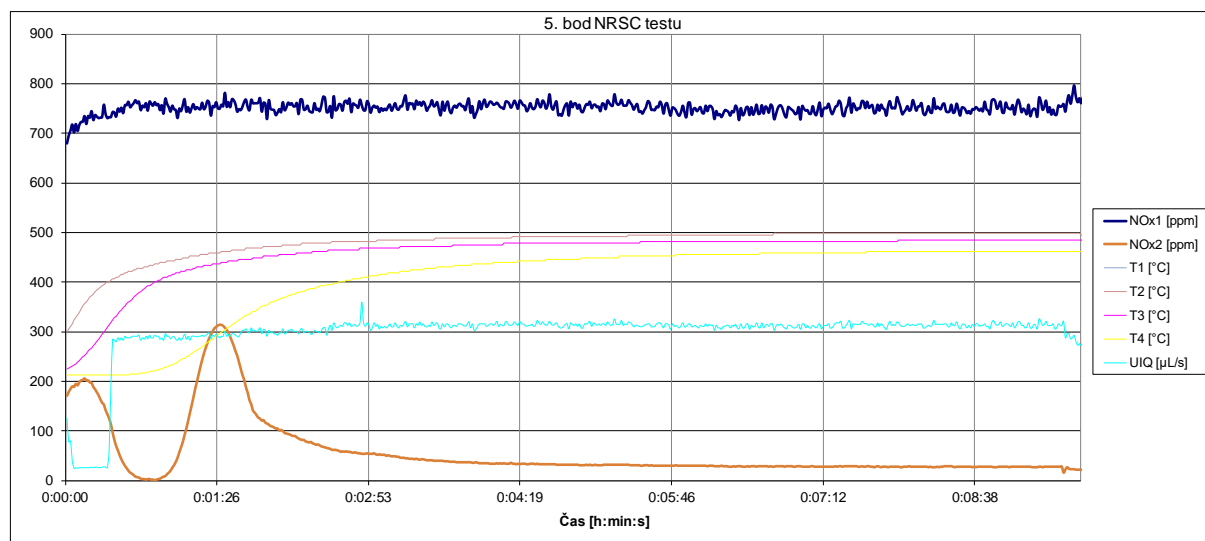
Obr. 65 NRSC 2-bod, hodnoty NO_x1 , NO_x2 , teploty na EAT, vstřikované množství močoviny



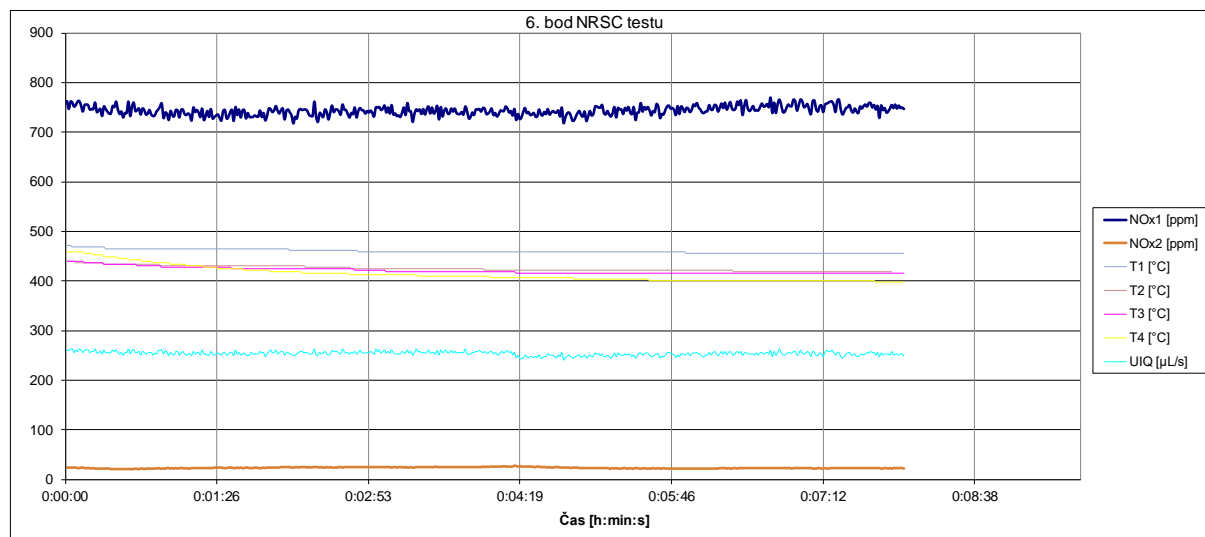
Obr. 66 NRSC 3-bod, hodnoty NO_x1 , NO_x2 , teploty na EAT, vstřikované množství močoviny



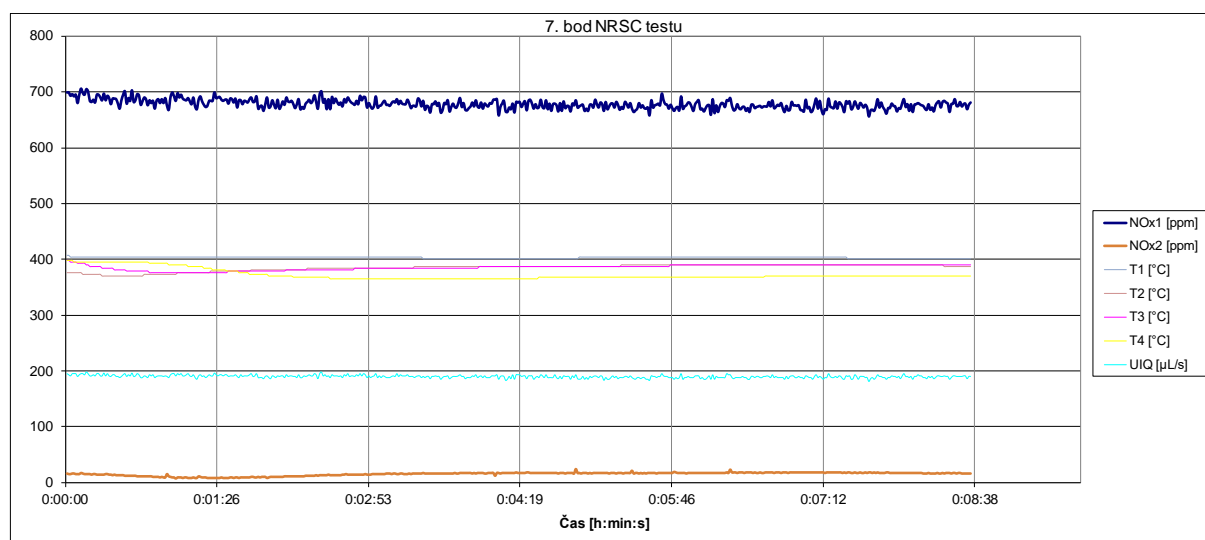
Obr. 67 NRSC 4-bod, hodnoty NO_x1 , NO_x2 , teploty na EAT, vstřikované množství močoviny



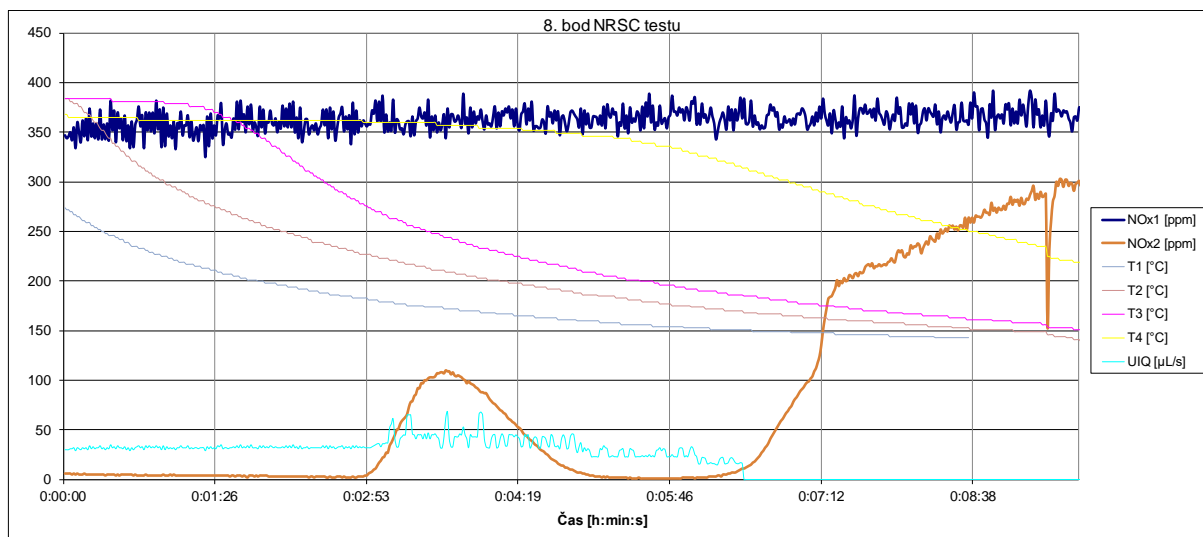
Obr. 68 NRSC 5-bod, hodnoty NO_x1 , NO_x2 , teploty na EAT, vstřikované množství močoviny



Obr. 69 NRSC 6-bod, hodnoty NO_x1 , NO_x2 , teploty na EAT, vstřikované množství močoviny





Obr. 70 NRSC 7-bod, hodnoty NO_x1 , NO_x2 , teploty na EAT, vstřikované množství močoviny





Obr. 71 NRSC 8-bod, hodnoty NOx1, NOx2, teploty na EAT, vstříkované množství močoviny

Po optimalizaci jednotlivých bodů bylo přistoupeno k automatickému měření emisí dle legislativy. Výsledek NRSC testu je možno spočítat např. pomocí tabulkového procesoru EXCEL, nebo je vyhodnocení NRSC cyklu prováděno automaticky softwarem brzdy od firmy AVL.


	ECE NRSC - C1		operator test date testcell name project test serie testname		Vacek, Marsch 2017/7/11 TQTC111 GEM301EC Zetor_170703 170711(2)	
	(2004/26/EC)					
Overall Test Data						
TEST IDENTIFICATION						
start time of test	hhmmss	1:42:28 PM	system parameter	-	SYS_Kobka5_GEM301EC_Final	
end time of test	hhmmss	3:17:18 PM	unit under test parameter	-	UUT_Zetor_103kW_201706_wo_far	
			test facility parameter	-	TFP_GEM301EC_Final	
			test parameter	-	TST_GEM301EC_ECE_NRSC	
ENGINE DATA						
manufacturer	-	Zetor	rated speed	rpm	2200.00	
engine number	-	2011.0	maximum engine speed	rpm	2555.00	
engine family	-	108 kW	idle speed	rpm	826.00	
injection system	-	DI	model year	-	2014	
transmission type	-	Manual	number of cylinders	-	4	
engine type	-	compression ignition	engine displacement	dm3	4.1520	
FUEL DATA						
fuel name	-	Diesel	massfraction H	-	0.13400	
fuel id	-	123	massfraction C	-	0.86600	
fuel density	g/cm3	0.830	massfraction O	-	0.00000	
molar mass fuel	-	13.869	massfraction W	-	0.00000	
H/C ratio	-	1.830	massfraction N	-	0.00000	
stoichiometric factor	-	13.486	massfraction S	-	0.00000	
BRAKE SPECIFIC RESULT TEST						
			LIMIT	NRSC Stage 3B C1		
CO2	g/kWh	780.792	0.000	-		
CO	g/kWh	-0.262	5.000	Ok		
NOx	g/kWh	0.226	3.300	Ok		
THC	g/kWh	0.044	0.190	Ok		
CH4	g/kWh	0.115	0.000	-		
NMHC	g/kWh	0.045	0.000	-		
			0.000	-		
brake spec. PM emission	g/kWh	0.002	0.025	Ok		
NMHC+NOX	g/kWh	0.27143	0.000	-		
2017/07/14		GEM301EC				2 / 6

Obr. 72 NRSC výsledky testu v TÜV SÜD



	ECE NRSC - C1 (2004/26/EC) Environment Data				operator test date testcell name project test serie testname				Vacek, Marsch 2017/7/11 TQTC111 GEM301EC Zetor_170703 170711(2)	
TESTCELL DATA										
mode	-	1	2	3	4	5	6	7	8	
temperature air testcell	°C	25.412	25.641	25.421	24.416	24.442	24.479	24.352	24.248	
pressure air testcell	kPa	98.156	98.140	98.176	98.200	98.179	98.183	98.206	98.207	
relative humidity of testcell	%	51.655	50.746	50.300	54.938	53.964	54.163	54.502	56.291	
ENGINE INFO										
mode	-	1	2	3	4	5	6	7	8	
temperature of engine inlet air	°C	25.412	25.641	25.421	24.416	24.442	24.479	24.352	24.248	
pressure air engine inlet	kPa	98.156	98.140	98.176	98.200	98.179	98.183	98.206	98.207	
relative humidity air engine inlet	%	51.655	50.746	50.300	54.938	53.964	54.163	54.502	56.291	
absolute humidity	g/kg	10.809	10.765	10.524	10.828	10.652	10.716	10.699	10.986	
fuel temperature	°C	37.984	38.033	37.924	37.974	38.024	37.973	38.037	37.460	
correctionfactor NOx	-	0.999	0.997	0.994	1.004	1.001	1.002	1.002	1.008	
F - Factor	-	1.021	1.022	1.021	1.016	1.016	1.016	1.015	1.015	
F - Factor limit check	-	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	
actual speed	rpm	2199.983	2199.994	2200.001	2199.993	1480.001	1480.002	1479.993	825.039	
actual torque	Nm	466.181	354.052	235.994	47.226	590.686	449.895	300.019	-0.009	
net power	kW	107.399	81.570	54.367	10.882	91.553	69.731	46.500	1.867	
DILUTION SYSTEM										
mode	-	1	2	3	4	5	6	7	8	
temperature primary dilution air	°C	25.412	25.641	25.421	24.416	24.442	24.479	24.352	24.248	
pressure primary dilution air	kPa	98.156	98.140	98.176	98.200	98.179	98.183	98.206	98.207	
relative humidity of primary dilution air	%	51.655	50.746	50.300	54.938	53.964	54.163	54.502	56.291	
absolute humidity diluted	g/kg	10.809	10.765	10.524	10.828	10.652	10.716	10.699	10.986	
dilutionfactor	-	15.354	20.140	28.069	65.690	19.573	25.580	36.697	201.747	
massflow dilution air	kg/h	5696.653	5802.926	5934.274	6146.770	5864.512	5957.974	6065.726	6277.241	
massflow exhaust diluted	kg/h	6093.510	6106.109	6153.504	6241.789	6180.263	6200.362	6235.648	6308.511	
2017/07/14										
GEM301EC										
3 / 6										

Obr. 73 NRSC výsledky testu v TÜV SÜD



ECE NRSC - C1

(2004/26/EC)

Particulate Data Diluted

operator

test date

testcell name

project

test serie

testname

Vacek, Marsch


2017/7/11

TQTC111

GEM301EC

Zetor_170703

170711(2)



PARTICULATE SAMPLER

mode	-	1	2	3	4	5	6	7	8
massflow exhaust diluted	kg/h	6093.510	6106.109	6153.504	6241.789	6180.263	6200.362	6235.648	6308.511
massflow through filter	g/min	47.343	47.586	47.643	47.458	47.325	47.408	47.301	47.655
massflow probe	g/min	47.343	47.586	47.643	47.458	47.325	47.408	47.301	47.655
particulate loading time	s	105.950	106.100	106.100	71.100	71.100	71.100	71.150	106.150
filter temperature max.	°C	40.438	40.526	39.488	37.420	36.302	36.300	34.835	33.111
filter temperature min.	°C	26.131	27.249	28.199	28.456	28.286	28.199	28.113	27.941
weighting factor	-	0.150	0.150	0.150	0.100	0.100	0.100	0.100	0.150
weighting factor effective	-	0.151	0.152	0.151	0.099	0.100	0.100	0.099	0.147
weighting factor deviation	-	0.001	0.002	0.001	-0.001	0.000	-0.000	-0.001	-0.003

PARTICULATE RESULTS PTS based on

0.10 mg

correction factor particulates	-	0.999
assumed particulate mass	mg	216.893
assumed brake specific emission	g/kWh	0.019

FINAL PARTICULATE RESULTS PTS


filterpair ID PTS	-	1.0000
samplemass filter	mg	0.011
particulate mass	mg	23.858
brake spec. PM emission	g/kWh	0.002

2017/07/14

GEM301EC

4 / 6

Obr. 74 NRSC výsledky testu v TÜV SÜD



ECE NRSC - C1

(2004/26/EC)

Diluted Gaseous

operator

test date

testcell name

project

test serie

testname

Vacek, Marsch


2017/7/11

TQTC111

GEM301EC

Zetor_170703

170711(2)



CONCENTRATION VALUES

mode	-	1	2	3	4	5	6	7	8
sampletime - gaseous	s	180.250	180.250	180.250	180.250	180.250	180.250	180.250	180.200
concentration CO2 diluted	ppm	8729.318	6655.375	4775.663	2041.147	6848.088	5240.227	3653.133	665.184
concentration CO diluted	ppm	-3.038	-2.815	-2.565	-2.215	-2.856	-2.686	-2.470	-1.903
concentration NOx diluted	ppm	1.951	1.179	0.797	1.316	1.297	0.720	0.321	2.610
concentration THC diluted	ppm	0.835	0.852	0.901	0.952	0.860	0.862	0.867	0.918
concentration CH4 diluted	ppm	1.869	1.897	1.956	2.134	1.944	1.972	2.000	2.085
concentration NMHC diluted	ppm	0.851	0.868	0.918	0.970	0.877	0.879	0.885	0.936

MASSFLOW EMISSION VALUES

massflow CO2 diluted	g/h	80799	61730	44639	19353	64289	49354	34602	6374
massflow CO diluted	g/h	-17.885	-16.604	-15.246	-13.353	-17.051	-16.086	-14.881	-11.600
massflow NOx diluted	g/h	18.849	11.398	7.741	13.095	12.731	7.096	3.184	26.338
massflow THC diluted	g/h	2.4366	2.4916	2.6559	2.8455	2.5466	2.5597	2.5906	2.7738
massflow CH4 diluted	g/h	6.3091	6.4160	6.6676	7.3763	6.6556	6.7707	6.9065	7.2856
massflow NMHC diluted	g/h	2.4843	2.5401	2.7060	2.9013	2.5970	2.6111	2.6430	2.8290

BRAKE SPECIFIC EMISSIONS

CO2	g/kWh	780.792
CO	g/kWh	-0.262
NOx	g/kWh	0.226
THC	g/kWh	0.044
CH4	g/kWh	0.115
NMHC	g/kWh	0.045

USED DELAYTIMES/CUTTER EFFICIENCY

efficiency ethane diluted	-	0.704
efficiency methane diluted	-	100.000
delaytime CO2 diluted	s	8.500
delaytime CO diluted	s	7.600
delaytime NOx diluted	s	8.300
delaytime THC diluted	s	5.600
delaytime CH4 diluted	s	6.800

FUEL CONSUMPTION

fuel consumption measured	kg/h	24.714	18.627	13.057	4.964	19.177	14.473	9.773	0.789
fuel consumption calculated	kg/h	25.457	19.448	14.063	6.095	20.254	15.548	10.900	2.006
deviation meas. - calc.	%	3.004	4.409	7.699	22.785	5.614	7.430	11.532	154.365

2017/07/14

GEM301EC

5 / 6

Obr. 75 NRSC výsledky testu v TÜV SÜD



Výsledek daného NRSC testu lze shrnout následovně:

NO_x 0,226 g/kWh (limit 0,4 g/kWh)

HC 0,044 g/kWh (limit 0,19 g/kWh)

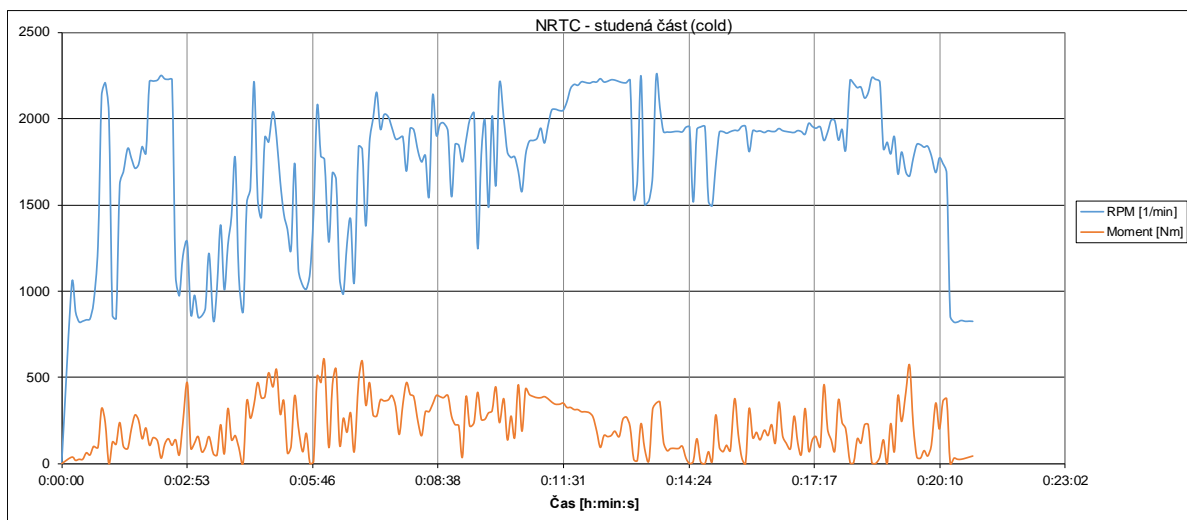
CO 0,262 g/kWh (limit 5 g/kWh)

PM 0,002 g/kWh (limit 0,025 g/kWh)

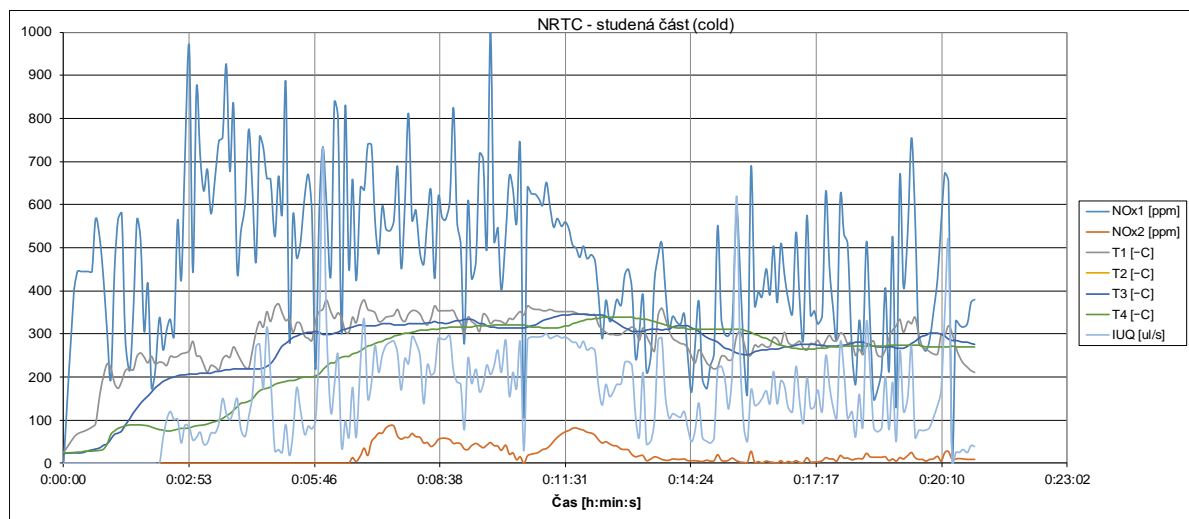
Pro možnosti mapování a následného využití při řešení emisního stupně STAGE 5 byly počítány částice viz. výsledek NRSC testu. Jak je publikováno [18] pro emisní stupeň STAGE 5 bude požadováno i počítání pevných částic. V emisní normě pro USA se s tímto zatím nepočítá [19] [20].

8.2 MĚŘENÍ V TRANZIENTNÍM TESTU (NRTC)

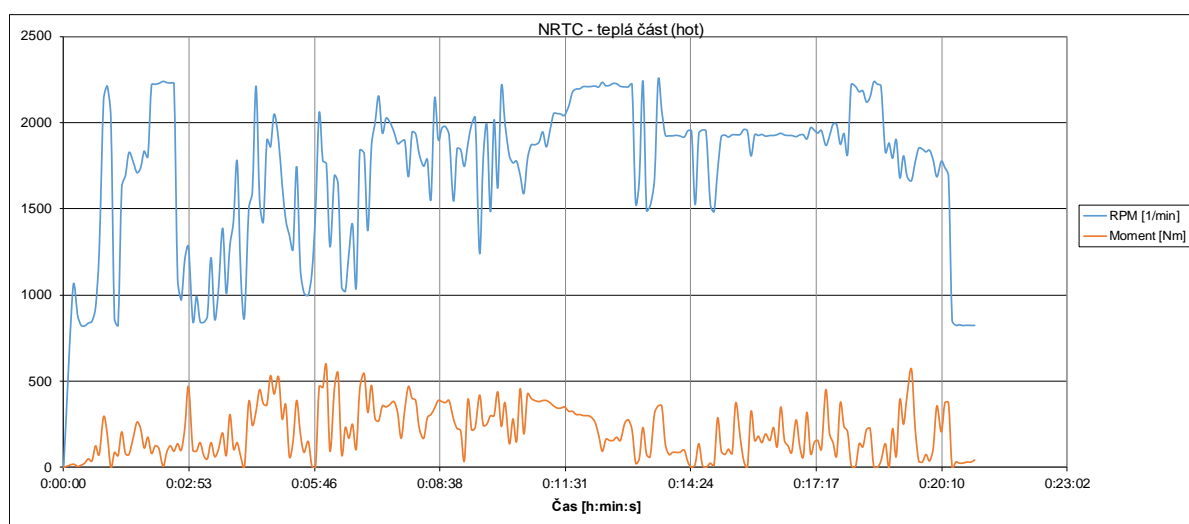
Odladění emisí v tranzientním testu je velmi náročné, jelikož je to dynamický test (viz. kapitola 2.1.4). Pro odladění emisí NO_x, a to zejména množství vstřikování močoviny bylo potřeba na zkušebně provést více jak šedesát NRTC cyklů. Tato velmi náročná činnost zabrala více jak dva roky optimalizací.



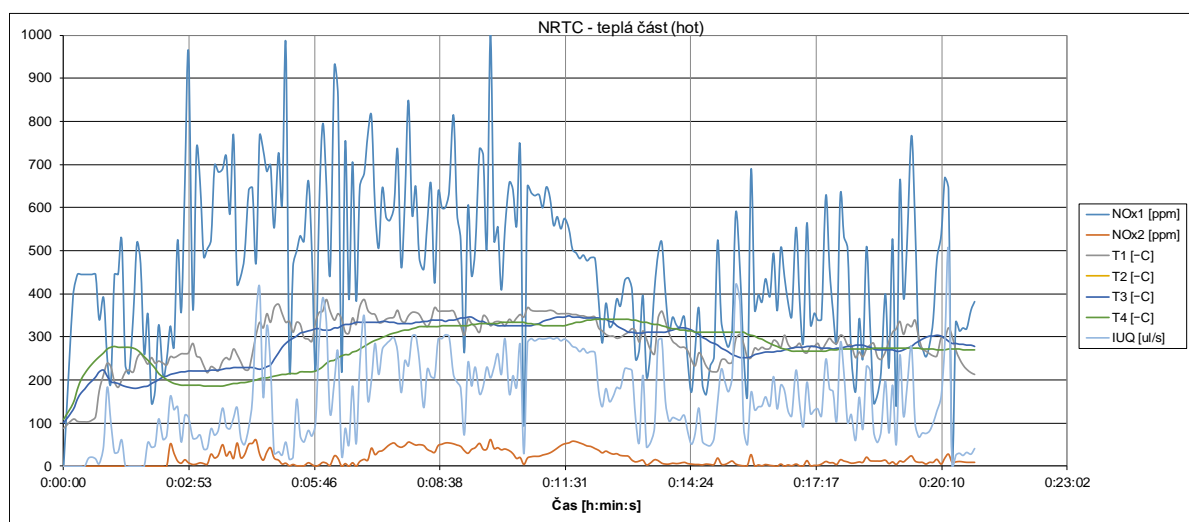
Obr. 76 NRTC-cold, průběh otáček a momentu



Obr. 77 NRTC-cold, hodnoty NOx1, NOx2, teploty na EAT, vstřikované množství močoviny



Obr. 78 NRTC-hot, průběh otáček a momentu



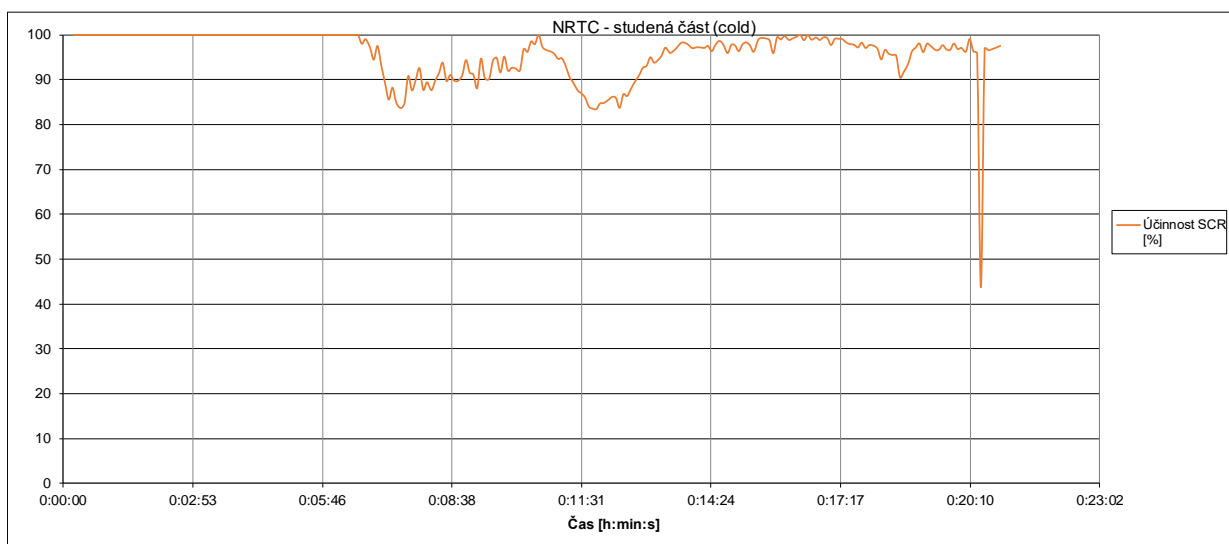
Obr. 79 NRTC-hot, hodnoty NOx1, NOx2, teploty na EAT, vstřikované množství močoviny



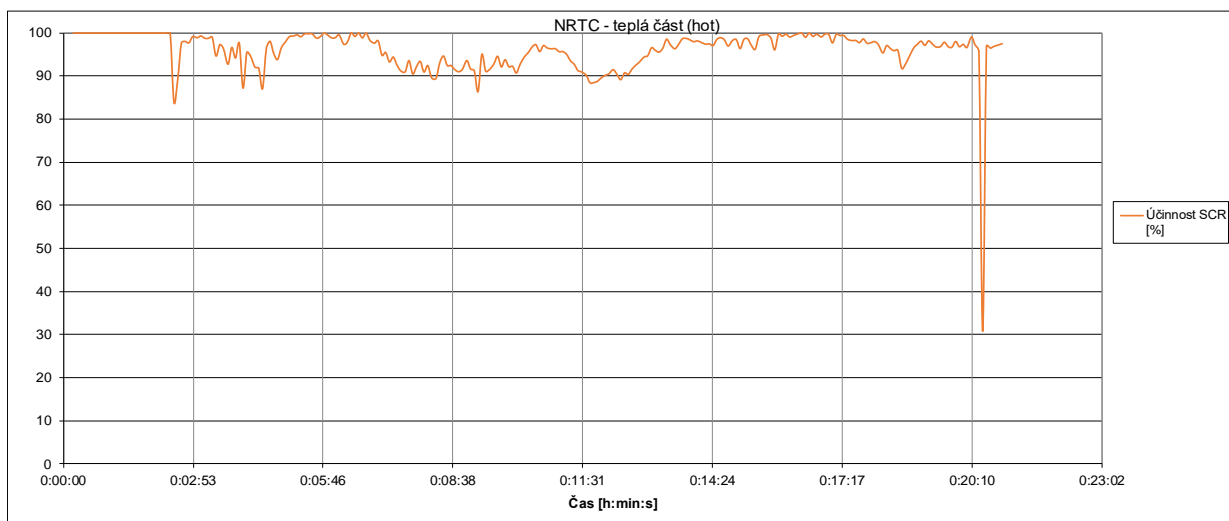
Pro posouzení zda optimalizace systému z hlediska redukce NO_x se ukazuje jako výhodné vyjádřit účinnost SCR systému jako:

$$\eta_{\text{SCR}} = \frac{\text{NO}_{x1} - \text{NO}_{x2}}{\text{NO}_{x1}} \times 100 \quad , \quad (21)$$

V Obr. 80 a 81 je zobrazen průběh účinnosti SCR katalyzátoru během studeného a teplého dynamického testu.



Obr. 80 NRTC-cold, účinnost SCR


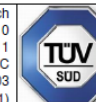


Obr. 81 NRTC-hot, účinnost SCR

Jak je z grafů patrné, tak na začátku cyklu je 100% účinnost. Toto ale není pravda, jelikož motor je studený a NO_x senzory i vstřikování močoviny je na počátku nefunkční, jelikož teplota T1 nedosáhla více jak 150°C.

Průměrná hodnota účinnosti během studené části je 94,1% a během teplé části 95,6%. Toto je velmi dobrá hodnota pro dobrou redukci NO_x. Vyhodnocení NRTC cyklu je prováděno automaticky softwarem brzdy od firmy AVL.



		ECE NRTC <i>(2004/26/EC)</i> Overall Test Data		operator test date testcell name project test serie testname		Vacek, Marsch 2017/7/10 TQTC111 GEM301EC Zetor_170703 170710(1)		
TEST IDENTIFICATION								
start time of test	hhmmss	11:24:58 AM	system parameter	-	SYS_Kobka5_GEM301EC_Final			
end time of test	hhmmss	1:40:58 PM	unit under test parameter	-	UUT_Zetor_103kW_201706_wo_fan			
			test facility parameter	-	TFP_GEM301EC_Final			
			test parameter	-	TST_GEM301EC_ECE_NRTC			
ENGINE DATA								
manufacturer	-	Zetor	rated speed	rpm	2200.00			
engine number	-	2011.0	maximum engine speed	rpm	2555.00			
engine family	-	108 kW	idle speed	rpm	832.00			
injection system	-	DI	model year	-	2014			
transmission type	-	Manual	number of cylinders	-	4			
engine type	-	compression ignition	engine displacement	dm3	4.1520			
FUEL DATA								
fuel name	-	Diesel	massfraction H	-	0.13400			
fuel id	-	123	massfraction C	-	0.86600			
fuel density	g/cm3	0.830	massfraction O	-	0.00000			
molar mass fuel	-	13.969	massfraction W	-	0.00000			
H/C ratio	-	1.830	massfraction N	-	0.00000			
stoichiometric factor	-	13.486	massfraction S	-	0.00000			
BRAKE SPECIFIC RESULT TEST								
			LIMIT	NRC Stage 3B				
CO2	g/kWh	752.040	0.000	-				
CO	g/kWh	-0.074	5.000	Ok				
NOx	g/kWh	0.203	3.300	Ok				
THC	g/kWh	-0.005	0.190	Ok				
CH4	g/kWh	-0.009	0.000	-				
NMHC	g/kWh	-0.005	0.000	-				
			0.000					
brake spec. PM emission	g/kWh	0.003	0.025	Ok				
NMHC+NOX	g/kWh	0.19747	0.000	-				
2017/07/14			GEM301EC			2 / 8		

Obr. 82 NRTC výsledky testu v TÜV SÜD

Výsledek NOx daného testu byl 0.203 g/kWh, což je hluboko pod limitem 0.4 g/kWh, který předepisuje legislativa.



8.3 PŘEHLED VŠECH TESTŮ PROVÁDĚNÝCH V RÁMCI OPTIMALIZACE EMISNÍHO SYSTÉMU

Tab. 12 Souhrn všech testů prováděných v TÜV SÜD

Souhrn výsledků

Datum	Měřicí cyklus	Popis	CO ₂	CO	NO _x	HC	PM
			g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh
07.04.2014	NRTC	První zkušební test NRTC, váha vzduchu namontována před zaústěním profuku z klikové skříně a odběr vzduchu pro kompresor. Stejně jako v Zetoru.BEZ EGR	851,118	0,25	0,728	0,005	
09.04.2014	NRTC	Před zahájením testu odpojeno sání vzduchu pro kompresor za váhou vzduchu (zaslepeno). Vysoká hodnota NO _x - kolísal tlak za čerpadlem močoviny, z toho důvodu nepravdivé vstřikování močoviny. Po skončení testu zjištěno volné šroubení na filtru před čerpadlem močoviny, proto docházelo k zavzdušňování systému a jeho nesprávné funkci. BEZ EGR	827,283		2.189	0,003	0,005
09.04.2014	NRTC	NRTC 606 po odstranění důvodu zavzdušňování. Sání kompresoru zůstalo odpojeno od sání do motoru. BEZ EGR	814,801	1,217	0,764	0,002	0,004
09.04.2014	NRSC	patří k předešlému NRTC. BEZ EGR	807,581	-0,142	0,515	0,025	0,001
09.04.2014	NRTC hot hot	BEZ EGR	819,946	0,124	0,647	0,003	0,003
09.04.2014	NRTC	BEZ EGR	804,947	0,107	0,674	0,002	
09.04.2014	NRSC	BEZ EGR	806,118	-0,145	0,46	0,033	
09.04.2014	NRSC	EGR zapnuta 4 bod+volnoběh	803,549	-0,143	0,403	0,034	
10.04.2014	NRTC	verze 0-30, 8% otevření EGR, opravený volnoběh (v4360_egr_0-30_8_volnobeh.hex)	829,839	-0,016	0,511	0,002	
10.04.2014	NRTC	hot-hot – jenom pro průběh NO _x během cyklu pro DEC – 0,57 g/kWh – 623	836,600	-0,037	0,573	0,003	
10.04.2014	NRTC	cold (hot)–hot - úprava na vstřikování močoviny	825,524	-0,025	0,623	0,005	
15.04.2014	NRTC	cold-hot	806,228	-0,022	1,208	0,001	
15.04.2014	NRTC	hot-hot	827,681		0,527	0,003	
15.04.2014	NRSC		823,726	-0,123	0,373	0,031	

Pokračování tabulky na straně 80



Souhrn výsledků

Datum	Měřicí cyklus	Popis	CO ₂	CO	NO _x	HC	PM
			g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh
15.04.2014	NRTC	hot-hot	826,702	-0,051	0,516	0,003	
16.04.2014	NRTC	hot-hot	816,093	-0,044	0,272	0,004	
17.04.2014	NRTC	cold-hot	791,723	-0,030	0,351	0,038	
17.04.2014	NRSC		811,285	-0,123	0,348	0,038	
17.04.2014	NRTC	hot-hot	795,116	-0,047	0,397	0,003	
18.04.2014	NRTC	cold-hot - varianta EGR 60%	788,581	-0,008	0,355	0,002	
18.04.2014	NRSC	varianta EGR 60%			0,33		
07.05.2014	NRSC	bez EGR - surové emise	804,275	0,508	7,424	0,091	0,146
07.05.2014	NRTC	bez EGR-surové emise	805,103	1,103	7,553	0,036	0,221
07.05.2014	NRSC	EGR 60%-surové emise	796,376	0,584	5,9	0,064	0,189
07.05.2014	NRTC	EGR 60%-surové emise	800,404	1,477	5,218	0,036	0,367
25.07.2014	NRTC	EGR 60%-strategie 4 - homologační měření	822,800	-0,057	0,592	0,003	
26.07.2014	NRTC	EGR 60%-strategie 4 - homologační měření	813,644	-0,059	0,55	0,002	
26.07.2014	NRSC	EGR 60%-strategie 4 - homologační měření	837,037	-0,167	0,495	0,016	
26.07.2014	NRTC	EGR 60%-strategie 4 - homologační měření	843,423	-0,058	0,475	0,004	
26.07.2014	NRTC	EGR 60%-strategie 4 - homologační měření	841,665	-0,062	0,428	0,003	
30.06.2014	NRTC	EGR 60%-strategie 4 - homologační měření	829,368	-0,051	0,383	0,004	
30.06.2014	NRTC	EGR 60%-strategie 4 - homologační měření	820,643	-0,061	0,382	0,003	
01.07.2014	NRTC	EGR 60%-strategie 4 - homologační měření	804,010	-0,048	0,395	0,002	
01.07.2014	NRSC	EGR 60%-strategie 4 - homologační měření	815,210	-0,059	0,401	0,032	

Pokračování tabulky na straně 81



Souhrn výsledků

Datum	Měřicí cyklus	Popis	CO ₂	CO	NOx	HC	PM
			g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh
02.07.2014	NRTC	EGR 60%-strategie 4 - homologační měření-snížení předvstříku 12°(ověřeno tlakově 7.7.2014)	817,332	-0,057	0,303	0,002	
03.07.2014	NRSC	EGR 60%-strategie 4 - homologační měření-snížení předvstříku 12°(ověřeno tlakově 7.7.2014)	833,102	-0,171	0,405	0,032	
07.07.2014	NRSC	EGR 60%-strategie 4 - homologační měření-předvstřík 13.45°	864,608	-0,114	0,41	0,032	
08.07.2014	NRTC	EGR 60%-strategie 4 - homologační měření-předvstřík 12.5°	845,739	-0,043	0,312	0,002	
08.07.2014	NRSC	EGR 60%-strategie 4 - homologační měření-předvstřík 12.5°	853,513	-0,126	0,468	0,040	
09.07.2014	NRSC	EGR 60%-strategie 4 - homologační měření-předvstřík 12.5° -optimalizace Kris	846,778	-0,120	0,381	0,033	
09.07.2014	NRSC	EGR 65%-strategie 3 - homologační měření-předvstřík 12.5° -změna otevření EGR v bodě 2 otevřeno	845,983	-0,112	0,359	0,030	
10.07.2014	NRTC	EGR 65%-strategie 3 - homologační měření-předvstřík 12.5° -změna otevření EGR v bodě 2 otevřeno	848,137	-0,046	0,269	0,001	
01.10.2014	NRSC	EGR 65%-strategie 3 -předvstřík 13.3° -změna otevření EGR v bodě 2 otevřeno	865,891	-0,301	0,495	0,033	
02.10.2014	NRSC	EGR 65%-strategie 3 -předvstřík 13.3° -změna otevření EGR v bodě 2 otevřeno	841,123	-0,281	0,439	0,037	

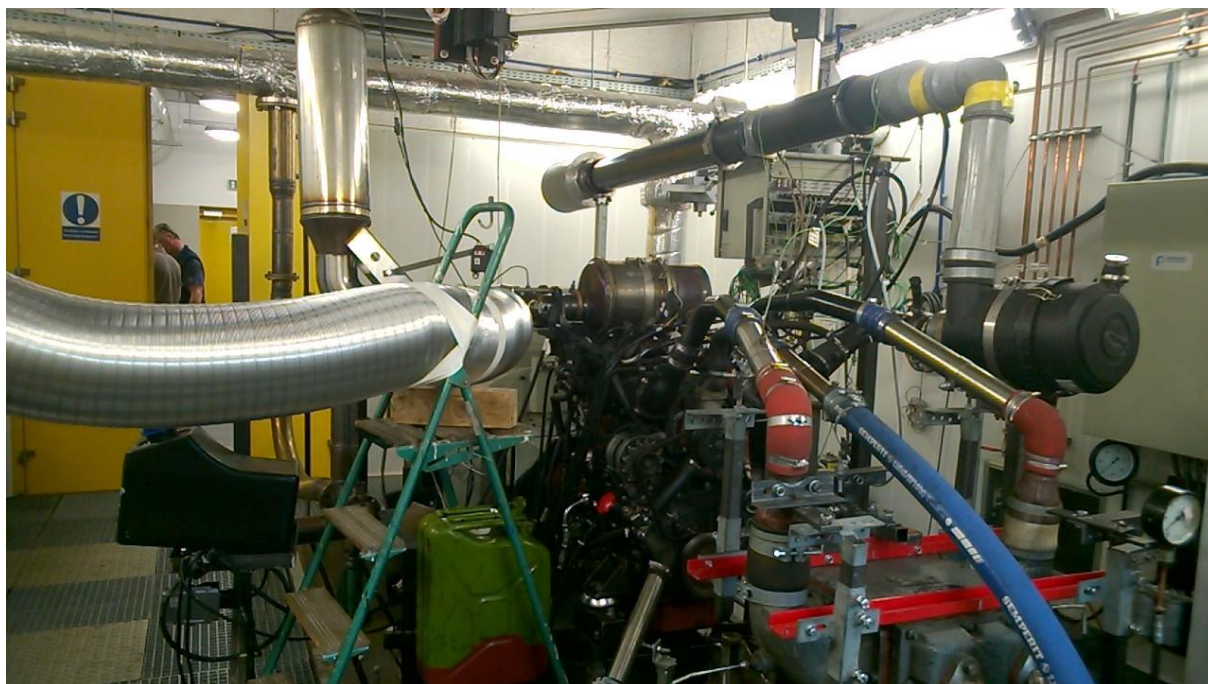
Pokračování tabulky na straně 82



Souhrn výsledků

Datum	Měřicí cyklus	Popis	CO ₂	CO	NO _x	HC	PM
			g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh
02.10.2014	NRSC	EGR 65%-strategie 3 -předvstřík 13.3° -změna otevření EGR v bodě 2 otevřeno	850,059	-0,272	0,456	0,027	
06.10.2014	NRTC	EGR 65%-strategie 3 -předvstřík 13.3° -změna otevření EGR v bodě 2 otevřeno	837,420	-0,054	0,471	0,008	
07.10.2014	NRTC	EGR 65%-strategie 3 -předvstřík 13.3° -změna otevření EGR v bodě 2 otevřeno	839,639	-0,055	0,31	0,021	
08.10.2014	NRSC	EGR 65%-strategie 3 -předvstřík 13.3° -změna otevření EGR v bodě 2 otevřeno	835,485	-0,159	0,411	0,068	
08.10.2014	NRTC	EGR 65%-strategie 3 -předvstřík 13.3° -změna otevření EGR v bodě 2 otevřeno	815,348	-0,030	0,37	0,007	
09.10.2014	NRTC	EGR 65%-strategie 3 -předvstřík 13.3° -změna otevření EGR v bodě 2 otevřeno	814,529	-0,040	0,391	0,005	
09.10.2014	NRSC	EGR 65%-strategie 3 -předvstřík 13.3° -změna otevření EGR v bodě 2 otevřeno	829,831	-0,154	0,401	0,049	
09.10.2014	NRSC	EGR 65%-strategie 3 -předvstřík 12.8° -změna otevření EGR v bodě 2 otevřeno			0,36942		
22.10.2014	NRTC	EGR 65%-strategie 3 -předvstřík 12.8° -použit nový DOC-měření bez záběhu DOC	816,885	-0,066	0,293	0,002	
22.10.2014	NRSC	EGR 65%-strategie 3 -předvstřík 12.8° -použit nový DOC-měření bez záběhu DOC	819,143	-0,135	0,352	0,028	
31.10.2014	NRTC	EGR 65%-strategie 3 -předvstřík 12.8° -použit nový DOC-měření po 8 hod záběhu DOC	828,274	-0,062	0,257	0,004	
31.10.2014	NRSC	EGR 65%-strategie 3 -předvstřík 12.8° -použit nový DOC-měření po 8 hod záběhu DOC	842,020	-0,085	0,35	0,049	
19.11.2014	NRSC	měření pro EPU bez ventilátoru, velký ofuk vnějšíku velké chladnutí systému	785,539	-0,057	0,411	0,055	

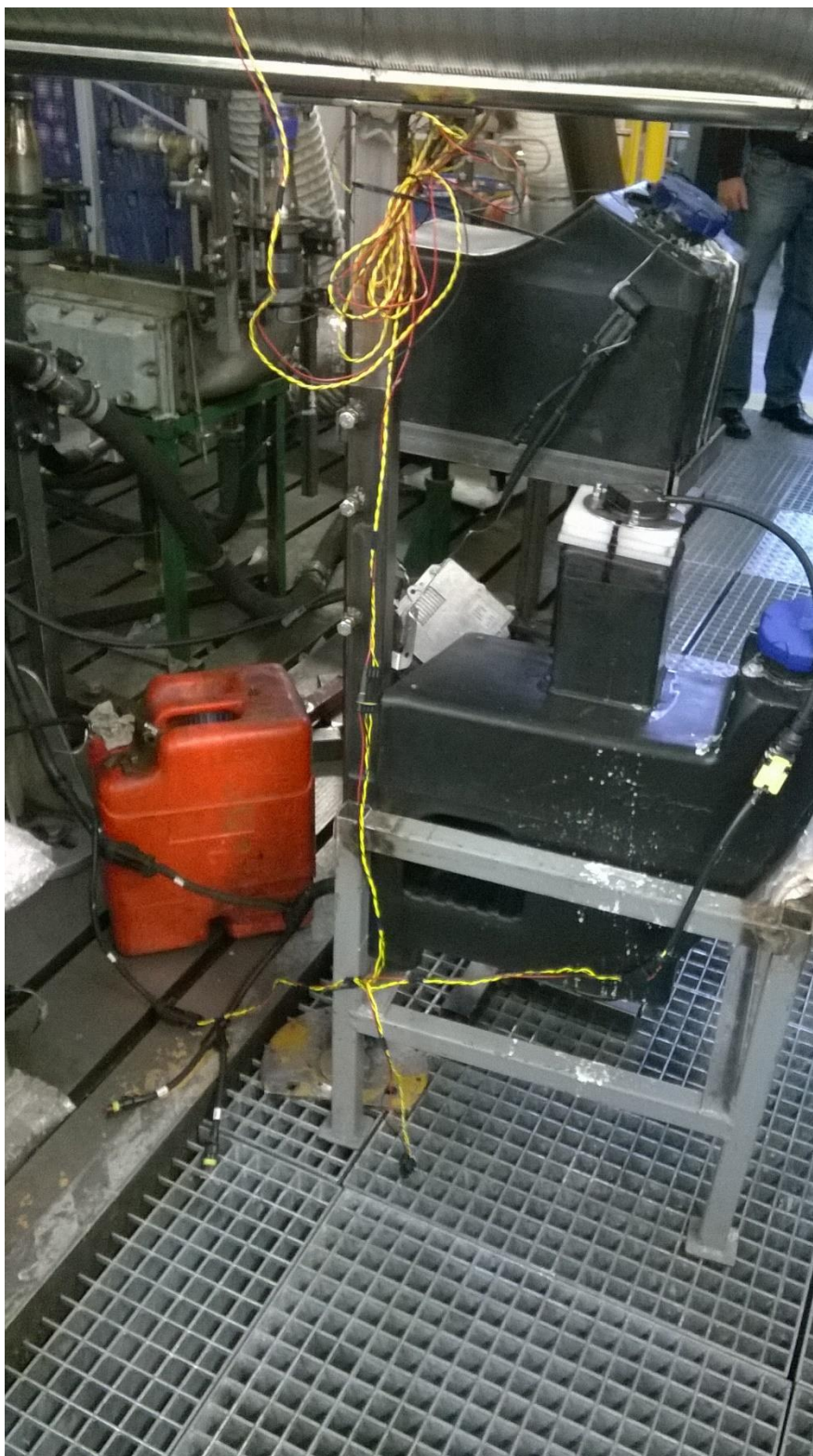
Tab. 12 Souhrn všech testů prováděných v TÜV SÜD



Obr. 83 Zástavba motoru na brzdovém stanovišti v TÜV SÜD



Obr. 84 Odvod výfukových plynů do analyzátoru emisí v TÜV SÜD



Obr. 85 Instalace nádrže močoviny při testování v TÜV SÜD



9 ZÁVĚR

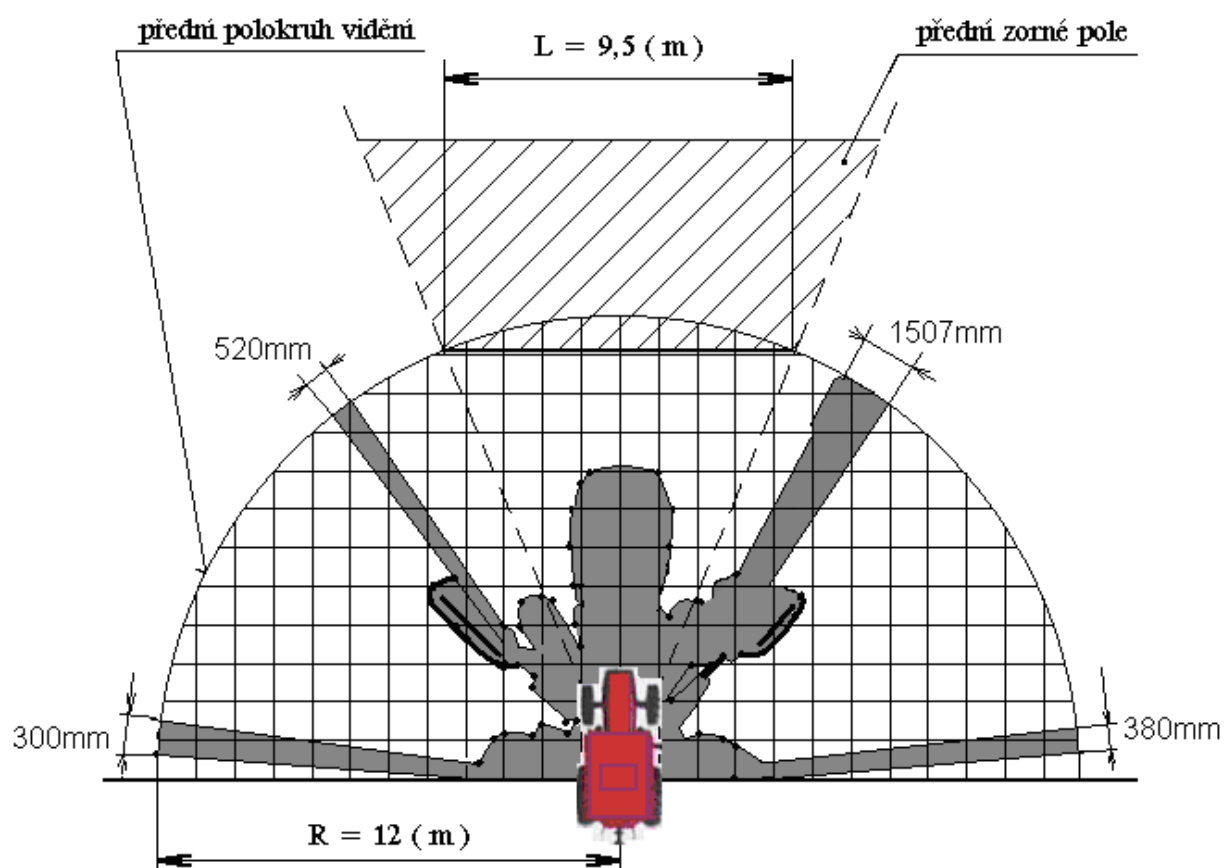
Cílem této disertační práce bylo najít řešení snížení emisí požadovaných emisním stupněm Stage 4 pro mimosilniční motory s válcovou jednotkou o objemu okolo jednoho litru. Navržený systém zaručuje při dodržení předpokladu surových emisí NO_x 5-6 g/kWh a pevných částic PM 0,12 – 0,18 g/kWh ve statickém osmibodovém testu dosažení limitů NO_x a PM ve stupni Stage 4. Základní uspořádání systému a jeho možnosti zástavby jsou voleny tak, aby byla možná implementace systému do traktorů ve výkonové třídě (56 – 130) kW. Systém je koncepčně zvolen tak, aby umožnil splnit i ostatní legislativní požadavky kladené na traktor, jako je výhled z kabiny, který je předepsán směrnicí 2008/2/EC.

Všechny komponenty systému jsou voleny tak, aby se maximálně využila možnost použití komponentů vyráběných pro automobilní průmysl. Tyto komponenty jsou většinou validovány pro motory pro dálkovou silniční přepravu v emisním stupni EURO 5 a zejména EURO 6. Jedná se především o substráty pro SRC katalyzátory a dále pak základní matrice pro DPF filtry. Jako nedílnou součástí celého systému je nutné aftertreatment osadit prvky pro možnost diagnostiky a zajištění funkčnosti. Jedná se zejména o NO_x senzory, které jsou v současné době hromadně využívány u motorů EURO 6.

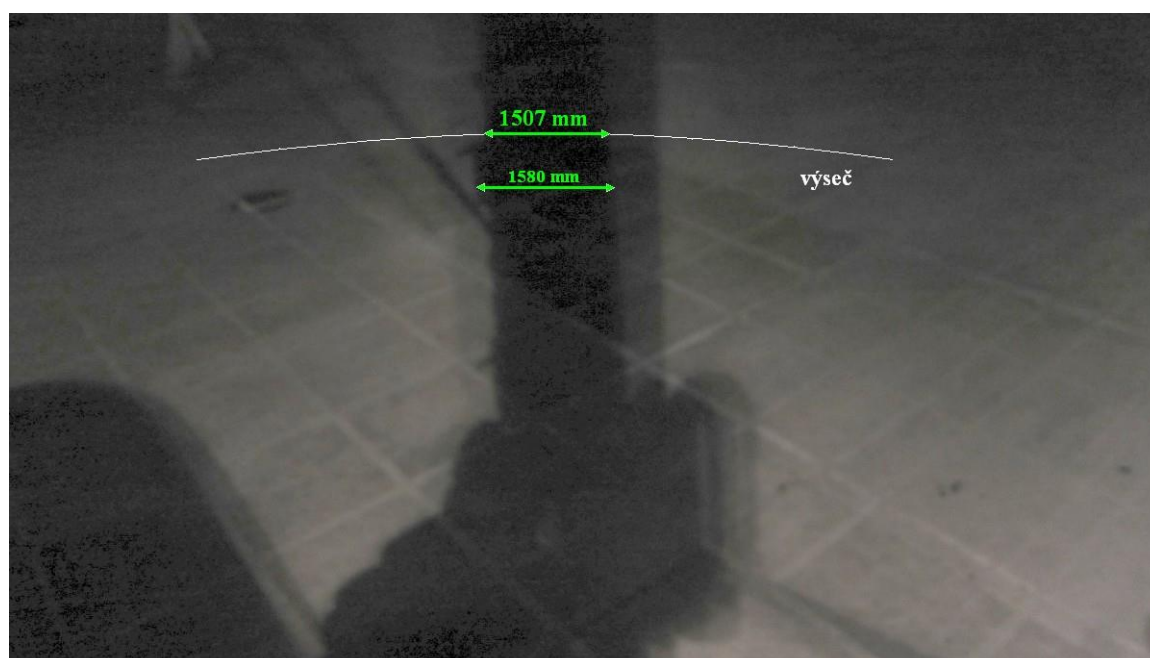
Na základě výsledků dosažených na homologační zkušebně v TÜV SÜD Czech lze konstatovat, že limity plynných emisí pro splnění STAGE 4 bylo dosaženo. Dále motor byl připraven i pro splnění dalších požadavků, tak jak jsou popsány v oddíle 3.2. Navržený aftertreatment má všechny předpoklady, které budou přicházet v dalších emisních stupních. Pro STAGE 5 bude požadováno i počítání částic, což navržený systém s DPF plně respektuje. I na základě měření prováděných na homologační zkušebně lze predikovat dosažení limitů v připravované emisní normě STAGE 5. Konstrukční řešení zástavby aftertreatmentu respektují i směrnici pro výhledy z kabiny traktoru dle 2008/2/ES (Obr. 86, 87). Celý systém aftertreatmentu byl zastaven do traktoru s cílem co nejmenších změn na kapotáži traktoru (Obr. 88). Pro motor byly navrženy kompletní uzly řídicích jednotek pro splnění všech požadavků daných směrnicí. Řídicí jednotka vstřikovacího systému zabezpečuje takzvané omezovací stavy. V případě poruchy emisního systému, kdy dojde k situaci, že motor má zvýšené emise nad limit daný směrnicí STAGE 4, motor musí přejít do prvního resp. do druhého omezovacího stavu.

Tab. 13 Výsledky homologační měření TÜV SÜD

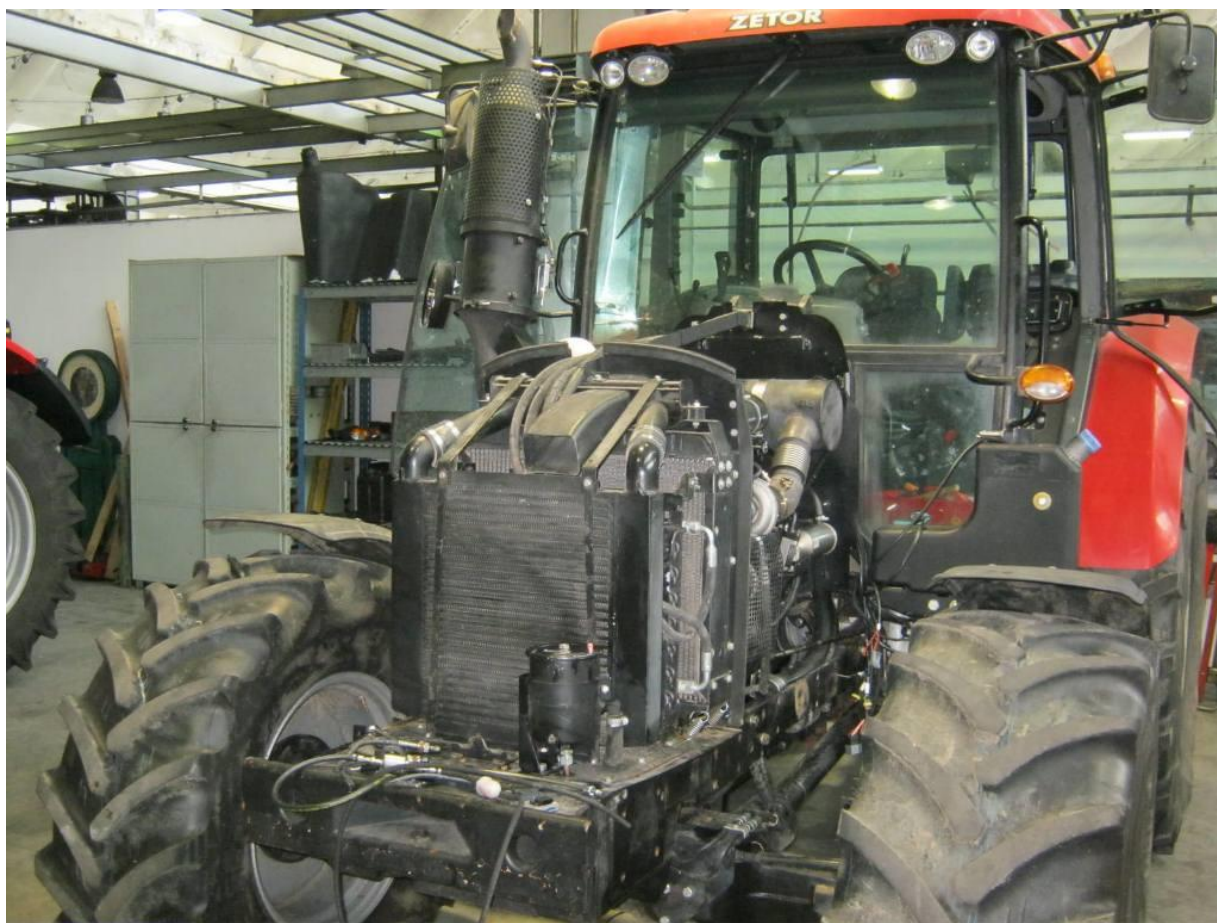
Typ testu	NRTC test	NRSC test	POŽADOVANÝ LIMIT EMISÍ STAGE 4
HC [g/kWh]	0,005	0,044	0,19
CO [g/kWh]	0,074	0,262	5,00
NO_x [g/kWh]	0,203	0,226	0,40
PM [g/kWh]	0,003	0,002	0,025



Obr. 86 Zastínění promítnutá na zorný polokruh



Obr. 87 Měření zastínění aftertreatmentu na traktoru



Obr. 88 Zástavba aftertreatmentu v traktoru



SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ

- [1] ŠMERDA, Tomáš, ČUPERA, Jiří. Emise vznětového motoru a systém SCR. *Mechanizace zemědělství: Odborný časopis pro zemědělskou a lesnickou techniku*. Praha: Profi Press s.r.o, 2011(7): 6. ISSN 0373-6776. Dostupné také z: <http://www.agrics.cz/obrazky-soubory/emise-vznetoveho-motoru-a-system-scr-4107d3.pdf?redir>
- [2] ROBERT BOSCH GMBH, [Hrsg.[Unternehmensbereich Automotive Aftermarket. *Abgastechnik für Dieselmotoren: Schadstoffminderung und Abgasnachbehandlung, Partikelfilter, DENOXTRONIC, On-Board-Diagnose OBD*. 1. Ausg., Oktober 2004. Plochingen: Bosch, 2004. ISBN 37-782-2061-6.
- [3] VLK, František. *Automobilová technická příručka*. 1. vyd. Brno: František Vlk, 2003, 791 s. ISBN 80-238-9681-4.
- [4] HROMÁDKO, Jan, HROMÁTKO, Jiří, HONIG Vladimír, MILER Petr. *Spalovací motory: komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol*. 1. vyd. Praha: Grada, 2011, 296 s. ISBN 978-80-247-3475-0.
- [5] STEJSKALÍK, Jaromír. *Snižování emisí vznětových motorů*. Určeno pro potřeby dalšího vzdělávání pedagogických pracovníků středních odborných škol. [Http://www.ssamp-knov.cz/upload/soubory/00032.pdf](http://www.ssamp-knov.cz/upload/soubory/00032.pdf) [online]. [cit. 2015-08-30]. Dostupné z: <http://www.ssamp-knov.cz/upload/soubory/00032.pdf>
- [6] *Cummins Emmisions Solutions* [online]. [cit. 2015-08-30]. Dostupné z: http://cumminsemissionsolutions.com/CES/CESContent//SiteContent/en/Binary_Asset/PDF/CES_Pocketcard_Off_Highway_FINAL.pdf
- [7] Andreas Neuper, Jia Juany, Harald Bressler, Wolfgang Albrecht A Clean Solution Exhaust Gas Treatment [Http://dc-america.resource.bosch.com/media/us/press_kits_1/conexpo_2014/technical_papers_and_success_stories/Rexroth_Exhaust_Gas_Treatment.pdf](http://dc-america.resource.bosch.com/media/us/press_kits_1/conexpo_2014/technical_papers_and_success_stories/Rexroth_Exhaust_Gas_Treatment.pdf) [online]. 2013 [cit. 2015-09-06]. Dostupné z: http://dc-america.resource.bosch.com/media/us/press_kits_1/conexpo_2014/technical_papers_and_success_stories/Rexroth_Exhaust_Gas_Treatment.pdf.
- [8] Standalone Exhaust-gas Aftertreatment. In: HJS Technology Portfolio [online]. 2010, 15.9.2010 [cit. 2012-04-07]. Dostupné z: http://www.hjs.com/download/26_03_5133_www_eng13_oe_technology
- [9] Diesel Particulate Filter. JOHNSON MATTHEY PUBLIC LIMITED COMPANY.Johnson Matthey [online]. 1.19.2012 [cit. 2012-01-19]. Dostupné z: <http://ect.jmcatalysts.com/emission-control-technologies-diesel-particulate-filter-DPF>
- [10] GSCHIEDLE, Rolf. *Příručka pro automechanika*. 3., přeprac. vyd. Přeložil Iva MICHŇOVÁ, přeložil Zdeněk MICHŇA, přeložil Jiří HANDLÍŘ. Praha: Europa-Sobotáles, 2007. ISBN 978-80-86706-17-7.



[11] *Diesel Emission Control Ltd. 36 Lily Close, St. Pauls Court, London W14 9YA, U.K.:* DPF Regeneration AECD R08 20160705 MD.docx

[12] *Komatsu* [online]. [cit. 2016-06-25]. Dostupné z: http://www.komatsu.com/CompanyInfo/profile/report/pdf/149-05_E.pdf

[13] *Nett Technologies Inc.* [online]. [cit. 2016-06-25]. Dostupné z: https://www.nettinc.com/wp-content/uploads/docs/nett_factsheet_diesel_particulate_filter.pdf

[14] NOVA, Isabella a Enrico TRONCONI. *Urea-SCR technology for deNOx after treatment of diesel exhausts*. New York: Springer, [2014]. Fundamental and applied catalysis. ISBN 9781489980700.

[15] *Diesel Emission Control Ltd. 36 Lily Close, St. Pauls Court, London W14 9YA, U.K.:* Tier IV - Zetor 103kW - SCR Control module - Rev 12_SerC.docx

[16] John Deere Announces Tier 4 Final Engine Technology [online] [cit.2018-04-26]. Dostupné z: <http://www.oemoffhighway.com/press_release/10637093/john-deere-announces-tier-4-final-stage-iv-engine-technology>

[17] Case IH Announces Its Tier 4 Final Solution [online] [cit. 2019-04-21]. Dostupné z: <http://growingny.com/news/2011/09/case-ih-announces-its-tier-4-final-solution>

[18] Emission Standarts: Europe: NonroadDiesel Engines[online] [cit. 2012-01-17]. Dostupné z: <http://www.dieselnet.com/standards/eu/nonroad.php>

[19] Emission Standarts: USA: Nonroad Diesel Engines[online] [cit. 2012-01-17]. Dostupné z: <http://www.dieselnet.com/standards/us/nonroad.php>

[20] SCR Technologie VOBOSYSTÉM s.r.o.[online] [cit. 2012-01-17]. Dostupné z: <http://www.vobosystem.cz/scr-technologie>

[21] HÁJEK, Ondřej. Emisní norma Tier4i: jak fungují nové motory v zemních strojích a na co si dát pozor[online]. [cit. 2016-12-22]. Dostupné z: http://bagry.cz/clanky/technika/emisni_norma_tier_4i_jak_funguji_nove_motory_v_zemnich_strojich_a_na_co_si_dat_pozor

[22] TAKÁTS, M. *Měření emisí spalovacích motorů*. 1. vydání. Praha : Vydavatelství ČVUT, 1997. 111 s. ISBN 80-01-01632-3.

[23] MACEK, J. *Spalovací motory I*. 1. vydání. Praha : Vydavatelství ČVUT, 2007. 260 s. ISBN 978-80-01-03618-1.

[24] BAUER, F., et al. *Traktory a jejich využití*. 2. vydání. Praha : Profi Press, 2013. 224 s. ISBN 978-80-86726-52-6.

[25] BAUER, F., SEDLÁK, P., ŠMERDA, T. *Traktory*. 1. vydání. Praha : Profi Press, 2006. 192 s. ISBN 80-86726-15-0.



[26] BAUMRUK, P. *Příslušenství spalovacích motorů*. 2. vydání. Praha : Vydavatelství ČVUT, 2002. 241 s. ISBN 80-01-02062-2.

[27] VOJTÍŠEK, Michal Dopad spalování rostlinných olejů ve vznětových motorech na výfukové emise [online]. [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/dopad-spalovani-rostlinnych-oleju-ve-vznetovych-motorech-na-vyfukove-emise>

[28] PEXA, M., KUBÍN K. *Vliv podílu biosložky na spotřebu paliva a emise traktoru ZETOR FORTERRA 8641* [online]. [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: <http://www.vuzt.cz/svt/vuzt/publ/P2010/019.PDF>

[29] KOŽOUŠEK, Josef. *Spalovací motory: celostátní vysokoškolská učebnice*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1956. Řada strojírenské literatury.

[30] *Matematické, fyzikální a chemické tabulky: pro střední školy*. Praha: Ottovo nakladatelství, 2015. ISBN 978-80-7451-472-2..

[31] PAVELEK, Milan. *Termomechanika*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-214-4300-6.

[32] HOFMANN, Karel. *Turbodmychadla, vozidlové turbíny a ventilátory: přepřehování spalovacích motorů : určeno pro posl. fak. strojní*. 2., nezm. vyd. Praha: SNTL, 1985.

[33] MACEK, Jan. *Spalovací turbíny, turbodmychadla a ventilátory: (přepřehování spalovacích motorů)*. Vyd. 3. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-010-2275-7.

[34] KLIMENT, Vladimír. *Naftový motor přepřehovaný turbodmychadlem*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989. Knižnice technických aktualit.

[35] SALGA, Jaroslav a Bohumír HOŘENÍ. *Tabulky proudění plynu*. Brno: Vojenská akademie Antonína Zápotockého, 1978. Knižnice technických aktualit.



SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

$ActTorqueCAN$	[%]	Procento točivého momentu z max. momentu vysílaného na CAN
$Alpha$	[-]	Korekční součinitel
ANR	[-]	Korekční faktor dle použitého typu povrchové úpravy
A_v	[J]	Vykonaná vnější práce
C_2H_6	[-]	Ethan
CO	[g/kWh]	Oxid uhelnatý
$CO(NH_2)_2$	[-]	Diamid kyseliny uhličité (močovina)
CO_2	[-]	Oxid uhličitý
$CDPF$	[-]	Filtr pevných částic s katalyzátorem (Catalyzed Diesel Particulate Filter)
$CorrSlope$	[-]	Korekční součinitel
c_p	[Jkg ⁻¹ K ⁻¹]	Měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku
DEF	[g/h]	Množství vstřikované nafty při regeneraci DPF
DOC	[-]	Diesel oxidační katalyzátor
DPF	[-]	Filtr částic
dQ	[J]	Změna tepla přivedeného soustavě
dp	[Pa]	Změna tlaku
dT	[K]	Změna teploty
EGR	[-]	Recirkulace výfukových plynů
G_{air}	[kg/hod]	Množství nasávaného vzduchu
G_{exh}	[kg/hod]	Množství výfukových plynů
G_{fuel}	[kg/hod]	Množství paliva
G_{in}	[kg/s]	Množství nasávaného vzduchu



H_2O	[-]	Voda
HC	[g/kWh]	Uhlovodíky
$Heat_{CapEx}$	[J/gK]	Měrná tepelná kapacita nafty
$Heat_D$	[J/uL]	Výhřevnost
i	[-]	Počet válců
ID_{CorT1}	[-]	Korekční faktor dle T1
ID_{CorT2}	[-]	Korekční faktor dle T2
ID_{CorT3}	[-]	Korekční faktor dle T3
ID_{CorT4}	[-]	Korekční faktor dle T4
ID_Q	[J]	Teplo potřebné pro zvýšení teploty výfukových plynů
$ID_{Q_{Basic}}$	[J]	Základní teplo potřebné pro zvýšení teploty výfukových plynů
IU_Q	[μl/s]	Množství vstřikované močoviny
$IU_{Q_{BASIC}}$	[μl/s]	Základní množství vstřikované močoviny
$konc_{urea}$	[%]	Koncentrace močoviny
m	[kg]	Hmotnost
MAF	[kg/hod]	Množství nasávaného vzduchu snímané snímačem množství nasávaného vzduchu
M_{exh}	[g/mol]	Molová hmotnost výfukových plynů
$M_{H_4N_2CO}$	[g/mol]	Molekulová hmotnost močoviny
m_{pe}	[g/kWh]	Měrná spotřeba motoru
n	[1/min]	Otáčky motoru
N_2	[-]	Dvouatomová molekula dusíku
NH_3	[-]	Amoniak
NO	[-]	Oxid dusnatý
NO_2	[-]	Oxid dusičitý



NO_x	[g/kWh]	Oxidy dusíku
$NDC (ATS)$	[-]	Vnitrostátní redukční příspěvky (nationally determined contributions)
$NRSC$	[-]	Statický měřicí cyklus
$NRTC$	[-]	Dynamický měřicí cyklus
O_2	[-]	Dvouatomová molekula kyslíku
OBD	[-]	Systém vlastní diagnostiky vozidla (On-Board Diagnostics)
$Odpor_{PF}$	[kPa]	Protitlak DPF (roven p_1)
p_{0T}	[mmHg]	Tlak výfukových plynů před turbinou TD
p_1	[mbar]	Protitlak aftertreatmentu
p_{2K}	[mmHg]	Tlak vzduchu za kompresorem TD
Pe	[kW]	Výkon motoru
PM	[g/kWh]	Pevné částice
Q	[J]	Teplo přivedené soustavě
$R_{VolMassEx}$	[g/l]	Hustota výfukových plynů
SCR	[-]	Selektivní katalytická redukce
SLI	[%]	Index zanesení DPF sazemi
$SlopeFact$	[-]	Korekční součinitel
$SlopeTempFact$	[-]	Korekční součinitel
$STAGE\ 3B$	[-]	Emisní stupeň platný od 01.01.2012
$STAGE\ IV$	[-]	Emisní stupeň platný od 01.10.2014
$STAGE\ V$	[-]	Emisní stupeň platný od 01.01.2020
T_1	[°C]	Teplota výfukových plynů za TD
T_2	[°C]	Teplota výfukových plynů za DOC katalyzátorem
t_{2T}	[°C]	Teplota výfukových plynů za TD (rovna T_1)



T_3	[°C]	Teplota výfukových plynů před SCR katalyzátorem
T_4	[°C]	Teplota výfukových plynů za SCR katalyzátorem
T_{Cat}	[°C]	Teplota SCR katalyzátoru
T_{Des}	[°C]	Cílová teplota (požadovaná teplota za DOC/DPF)
T_x	[°C]	Vstupní teplota (je rovna T_1)
V	[m ³]	Objem
$Vaporizer$	[μl]	Množství vstříkované nafty při regeneraci DPF
V_p	[mg/cykl]	Dávka vstříkovaného paliva do válce
Δp_{PF}	[kPa]	Tlaková ztráta před filtračním elementem DPF filtru
ΔU	[J]	Změna vnitřní energie
ρ_{moc}	[kg/l]	Hustota močoviny
$CorrT2$	[-]	Korekční součinitel
$CorrT3$	[-]	Korekční součinitel
$CorrT4$	[-]	Korekční součinitel
η_{SCR}	[%]	Účinnost SCR katalyzátoru



SEZNAM PŘÍLOH

CD Disc 1:

- Směrnice 97/68/EC
- Směrnice 2000/25/EC
- Směrnice ECE R120
- Směrnice ECE R24